コナジラミ類および媒介ウイルス病の発生生態と防除対策

野菜茶業研究所
野菜 IPM 研究チーム
飯田博之、本多健一郎

１．はじめに

コナジラミ類はウンカ、ヨコバイ、アブラムシ、カイガラムシ類などと同様に半翅目の同翅亜目（Homoptera）に属し、蛹の発育段階を持たない不完全変態昆虫である。成虫、幼虫ともに口針で植物の汁液から栄養を摂取し、甘露を排泄する。コナジラミ類の生物学的特徴として、幼虫期に固着生活を送ることが挙げられる。卵から孵化した１齢幼虫は crawler と呼ばれ歩行能力を持つが、２齢になると脚を持たない固着生活者となる。幼虫期は４齢まであり、４齢幼虫の終期には成虫の眼点が外から透けて見えるようになる。

日本国内で野菜を加害するコナジラミ類は、オンシツコナジラミとタバココナジラミである（末尾写真参照）。オンシツコナジラミ *Trialeurodes vaporariorum* (Westwood)は 1974 年に広島県で初めて発見された侵入害虫で、全国各地の施設で野菜や花き類に発生する。本種が多発すると排泄された甘露にすす病が発生し、農作物の品質を低下させる。また、キュウリ黄化病の病原ウイルスを媒介する。タバココナジラミ *Bemisia tabaci* (Gennadius)は、日本に以前から分布していたが、1989 年に海外からバイオタイプ B（シルバーリーフコナジラミ）が侵入し、施設栽培の野菜や花き類を中心に国内各地へ分布を広げた。さらに 2004 年には別系統であるバイオタイプ Q の侵入も確認され、現在国内各地で分布が拡大している。タバココナジラミも高密度になると排泄物にすす病が発生し農作物の品質を低下させるが、吸汁した植物に白化症や着色異常を発生させることによる被害も問題となる。さらに、トマト黄化葉巻病やウリ類の退緑黄化病の病原ウイルスを媒介するため、トマトやメロンなどの生産で深刻な阻害要因となっている。

ここでは、最近各地で問題となっているタバココナジラミのバイオタイプ Q を中心に生態と防除対策について述べてみたい。

２．タバココナジラミのバイオタイプ

タバココナジラミは形態的に区別できる特徴が乏しいため、過去に世界各地で様々な植物から採集された多くのコナジラミ個体群が、単一の「タバココナジラミ」として整理・記載された。このため、タバココナジラミは世界中に分布し、おびただしい数の作物を加害する「大害虫」として扱われている。しかし、タバココナジラミには寄主植物の異なる寄主レースや形態以外の生物学的特徴が異なる 20 種類以上のバイオタイプが知られている。

なかでも北米産のバイオタイプ A と中東原産で世界各地に世界各地に分布を広げたバイオタイプ B の間には、生化学的な特徴、遺伝子解析による特徴、寄主植物に与える生理障害の有無、個体群間の交雑能力などで大きな差異が存在する。このため、Bellows et al.（1994）は両者が種のレベルで異なっていると考え、バイオタイプ B を別種シルバーリーフコナジラミ *Bemisia argentifolii* Bellows & Perring として記載した。

しかし今日では、タバココナジラミは潜在種（cryptic species）であるシルバーリーフコ

ナジラミを含めて、数多くのバイオタイプからなる種複合（species complex）として扱われるべきと考えられている（Perring, 2001）。

３．日本に分布するタバココナジラミのバイオタイプ

日本では、従来からスイカズラやサツマイモ等に生息するタバココナジラミ（在来系統）が本州以西に分布することが知られている（宮武，1980）。また、沖縄県などの南西諸島では、本州の在来系統とはアイソザイムのバンドパターンやミトコンドリア 16S rRNA 遺伝子の塩基配列が異なる別系統のタバココナジラミの分布が報告されている（大泰司・岡田，1996：Lee and De Barro, 2000）。これら在来のタバココナジラミは農作物で多発生することは少なく、農業生産上の重要害虫ではなかった。

しかし 1989 年にタバココナジラミのバイオタイプ B（シルバーリーフコナジラミ）が海外から侵入すると、国内各地で分布を広げて各種の野菜や花き類を加害するようになった（松井，1993：1995a）。バイオタイプ B は高密度で寄生すると作物の生育を阻害し、幼虫が排出した甘露に発生するすす病によって収穫物の品質低下をもたらすほか、多くの作物で葉や茎、果実を白化させ、トマトでは色彩異常果を発生させることも問題となった。1996 年に TYLCV が侵入した後は、本ウイルス病の媒介虫としてその防除がより切実な問題となり、タバココナジラミに対する薬剤防除回数も増加することとなった。

さらに最近は、スペインを原産地とする別系統のタバココナジラミ（バイオタイプ Q）の日本への侵入が確認され（Ueda and Brown, 2006）、東北地方から九州までの広い地域（41 都府県）に分布を拡大していることが明らかになった（図１）。

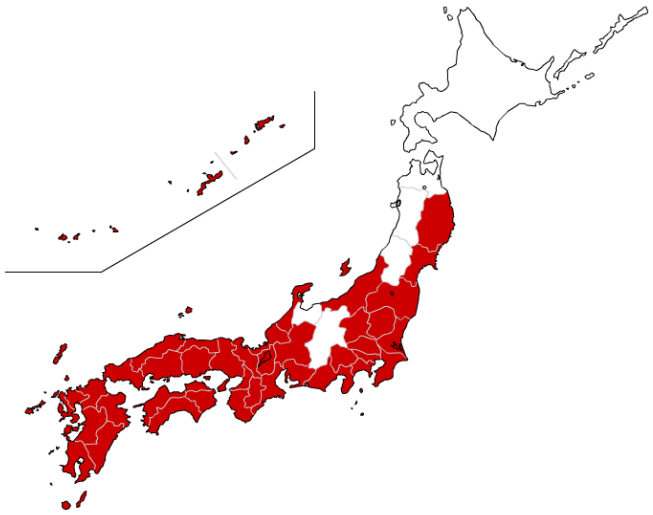


図１．バイオタイプ Q が確認された都府県（2009 年 5 月現在）

Ueda et al.（2009）は、日本国内で発生するタバココナジラミのバイオタイプについてミトコンドリア CO1 遺伝子の塩基配列などの解析を行い、本州以西でスイカズラ等に生息する在来系統をバイオタイプ JpL と命名した。また、南西諸島に分布する別の在来系統はバイオタイプ Nauru であることも明らかにした。従って、現在日本国内で発生しているタバココナジラミには、主に４種類のバイオタイプ（JpL、Nauru、B、Q）が含まれている。

４．バイオタイプ Q の寄主植物

2009 年 5 月現在、バイオタイプ B および Q の日本で確認された寄主植物はそれぞれ 30 科 88 種｛安藤・林（1992）および野菜茶研調査｝、30 科 64 種（飯田ら, 2009）で、両バイオタイプに共通する寄主植物は少なくとも 19 科 40 種に及ぶ（表１）。

表１　日本国内で記録されたタバココナジラミバイオタイプ Q の寄主植物（飯田ら, 2009）

	科名	学名	種または変種名、作物名	学名
野菜茶業研究所（一部，共同研究機関）で確認されたもの	キク	Compositae	キク e)	Chrysanthemum morifolium Romat.
			レタス e)	Lactuca sativa L. Capita
			アスター e)	Callistephus chinensis Nees
			ノゲシ a)e)	Sonchus oleracceus L.
			セイタカアワダチソウ a)e)	Solidago altissima L.
			ヒマワリ	Helianthus annuus L.
			アキノノゲシ e)	Lactuca laciniata Makino
			オオアレチノギク e)	Erigeron sumatrensis Retz.
			ガーベラ d)e)	Gerbera jamesonii Bol. ex Adlam.
	ナス	Solanaceae	トマト（ミニトマト）a)e)	Lycopersicon esculentum Mill.
			ナス a)e)	Solanum melongena L.
			ピーマン（パプリカ，シシトウ）a)e)	Capsicum annuum L.
			ジャガイモ a)e)	S. tuberosum L.
			イヌホオズキ e)	S. nigrum L.
			タバコ e)	Nicotiana tabacum L.
	ウリ	Cucurbitaceae	メロン a)e)	Cucumis melo L.
			キュウリ a)e)	C. sativus L.
			スイカ e)	Citrullus battich Forsk.
			マクワウリ e)	C. melo L. var. Makuwa Makino
			シマウリ	C. melo L.
			カボチャ a)e)	Cucurbita maxima Duch.
	シソ	Labiatae	バジル	Ocimum basilicum L.
			ホトケノザ a)e)	Lamium amplexicaule L.
			アジュガ a)	Ajuga sp.
			キランソウ b)	A. decumbens Thunb.
			シソ d)e)	Perilla frutescens (L.) Britton var. crispa
			セージ d)	Salvia officinalis L.
	アブラナ	Cruciferae	キャベツ a)e)	Brassica oleracea L. var. capitata L.
			コマツナ	B. rapa L.
			ダイコン e)	Raphanus sativus L.
	マメ	Leguminosae	ダイズ e)	Glycine max Merrill
			ソラマメ a)	Vicia faba L.
			インゲン a)e)	Phaseolus vulgaris L.
	ゴマノハグサ	Scrophulariaceae	オオイヌノフグリ e)	Veronica persica Poir.
			メカルドニア	Mecardonia sp.
			ジギタリス a)	Digitalis purpurea L.
	ユリ	Liliaceae	アスパラガス	Asparagus officinalis L.
			グロリオサ e)	Gloriosa superba L.
	ヒルガオ	Convolvulaceae	サツマイモ e)	Ipomoea batatas (L.) Lam.
			エンサイ a)	I. aquatica Forssk.
	バラ	Rosaceae	ウメ	Prunus mume Sieb. & Zucc.
			イチゴ a)e)	Fragaria × ananassa Duch.
	アオイ	Malvaceae	オクラ e)	Abelmoschus esculentus L.
			ハイビスカス e)	Hibiscus rosa-sinensis L.
	キキョウ	Campanulaceae	カンパニュラ a)	Campanula spp.
	フウチョウソウ	Capparidaceae	クレオメ e)	Cleome spinosa L.
	イソマツ	Plumbaginales	スターチス a)	Limoniumu sinuatum Miller
	スミレ	Violaceae	パンジー a)	Viola × wittrockiana Gams
	トウダイグサ	Euphorbiaceae	ポインセチア e)	Euphorbia pulcherrima Willd.
	ニレ	Ulmaceae	アキニレ	Ulmus parvifolia Jacq.
	アカネ	Rubiaceae	ブーバルディア e)	Bouvardia hybrida Hort.
	リンドウ	Gentianaceae	トルコギキョウ e)	Eustoma russellianum G. Don
	ヒユ	Amaranthaceae	イヌビユ	Amaranthus blitum L.

	ツリフネソウ	Balsaminaceae	ホウセンカ	Impatiens balsamina L.
	シナノキ	Tiliaceae	モロヘイヤ	Corchorus olitorius L.
	タデ	Polygonaceae	ハルタデ	Polygonum persicaria L.
	キョウチクトウ	Apocynaceae	サンパラソル e)	Mandevilla spp.
	スベリヒユ	Portulacaceae	ゴシキソウ	Portulacea oleracea L.
	クワ	Moraceae	イチジク e)	Ficus carica L.
	ツユクサ	Commelinaceae	マルバツユクサ a)c)e)	Commelina bengalensis L.
	アカバナ	Oenotheraceae	コマツヨイグサ a)c)	Oenothera laciniata Hill
	キツネノマゴ	Acanthaceae	クロサンドラ d)	Crossandra infundibuliformis (L.) Nees
上記以外で都府県の特殊報に記載された寄主植物	アブラナ	Cruciferae	茎ブロッコリーe)	Brassica oleracea L. Italica.
	クマツヅラ科	Verbenaceae	ランタナ e)	Lantana camara L.
計	30 科		64 種類	

a）植物上で幼虫も確認されたもの　　b）高知県農業技術センター調査

c）鹿児島県農業開発総合センター調査　　d）愛知県農業総合試験場調査

e）バイオタイプ B と共通の寄主。ただしバイオタイプ B の寄主植物は、安藤・林（1992）が報告した植物、および野菜茶業研究所に供試されたタバココナジラミのうち、バイオタイプ B として判定された個体が採集された植物。

５．発育と増殖

日本産のバイオタイプ B について、ナス、キュウリ、ピーマン、トマトでの発育と増殖率が報告された（Kakimoto et al., 2007）。卵から成虫までの平均発育期間は、25℃の実験室条件下ではナスで 21.8 日、キュウリで 22.4 日、ピーマンで 22.7 日、トマトで 25.6 日となり、トマトでの発育期間が他の供試作物に比べ有意に長かった。幼虫期の生存率はナスで最も高く、トマトで最も低くなり、両者の間には有意差があった。平均生涯産卵数は、ナスで 221.3、キュウリで 167.6、ピーマンで 92.3、トマトで 62.9 となった。内的自然増加率、純増殖率、平均世代期間は、それぞれナスで 0.168、185.1、31.2、キュウリで 0.153、130.7、31.8、ピーマンで 0.143、73.1、30.0、トマトで 0.110、36.1、32.7 となり、供試した 4 作物のうち、バイオタイプ B の増殖に最も適した作物はナスであり、最も適さない作物はトマトであると結論された。

また、Iida et al.,（2009）は、25℃の実験条件下でキャベツ、キュウリ、トマト、ナス、ピーマン、インゲン（5 品種）でのバイオタイプ B と Q の発育日数（産卵から成虫羽化まで）の平均値と生存率を比較した。キャベツ、トマト、ナスでの発育日数（平均値）はバイオタイプ Q がそれぞれ 28.8、28.0、28.4 日であったのに対し、B では 23.2、23.7、21.3 日となり、Q の発育日数は B よりも有意に長かった。キュウリとインゲン（サツキミドリ）では Q の発育日数はそれぞれ 24.6 日と 25.1 日であったのに対し、B では 22.6 日と 26.5 日になり、有意差は無かった。ピーマンでの発育日数は Q が 35.2 日であったのに対し B は 22.5 日となり、B が Q より 12 日短かったが、B の生存率は 6.1%と極めて低かったため、統計的な有意差は検出できなかった。幼虫の生存率はトマトでバイオタイプ B が Q より高く、ピーマンとインゲンではバイオタイプ Q の方が高かった。特にバイオタイプ B はサツキミドリ以外のインゲン 4 品種（ケンタッキー、ナガウズラ、モロッコ、本金時）ですべての幼虫が死亡した（図２、３）。バイオタイプ Q と B はインゲンの品種レベルで異なった寄主範囲を有しており、寄主に応じた発育特性もバイオタイプ間で異なると考えられた。

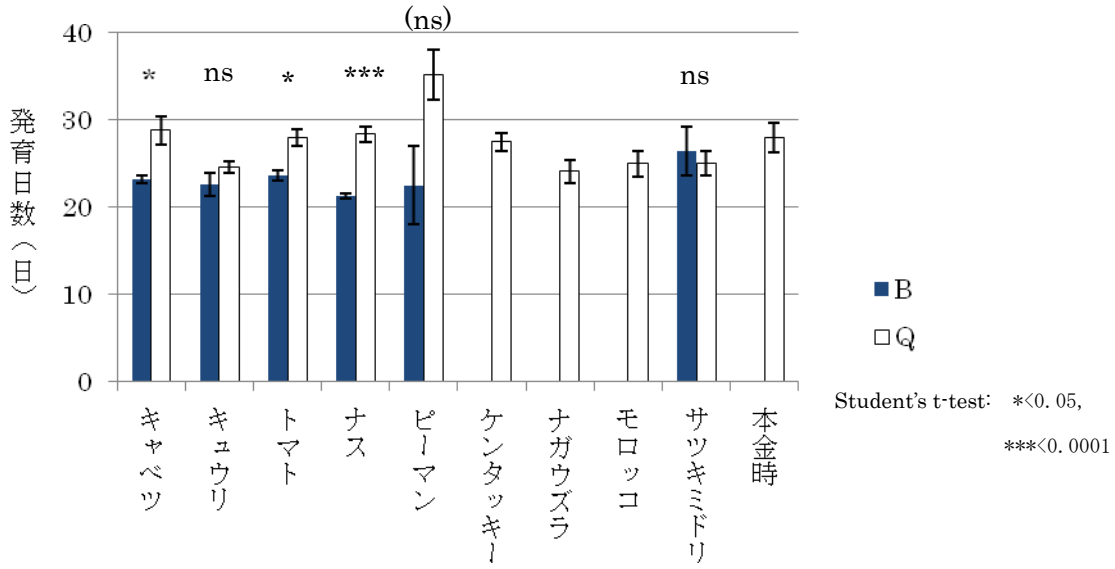


図２．各植物上での卵から羽化までの発育日数（平均±SE）(Iida et al. 2009)

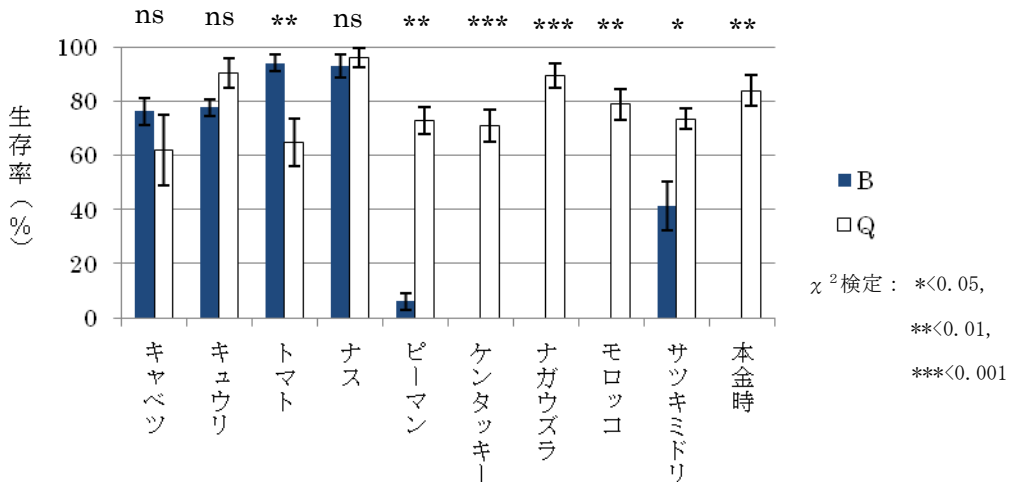


図３．各植物上での幼虫の生存率（平均±SE）(Iida et al. 2009)

６．越冬と耐寒性

日本在来のバイオタイプ JpL は、四国では幼虫がスイカズラで越冬する。これに対してバイオタイプ B は同じ場所にある野外のキャベツで越冬できなかった。若い幼虫の生存は、５℃のような低温条件によって強い悪影響を受けることがわかった（大泰司・岡田, 1996）。バイオタイプ Q もバイオタイプ B と同様に、日本の野外条件での越冬は困難と考えられるが、九州南部や四国南部などの温暖地ではわずかに越冬できる可能性がある。

７．ウイルス病の媒介

バイオタイプ B も Q も同程度の効率でトマト黄化葉巻病の病原ウイルス（TYLCV）を永続的に媒介する（北村ら, 2009）。また、同じくウリ類の退緑黄化病の病原ウイルス（CCYV）を半永続的に媒介する（奥田, 2009）。なお、オンシツコナジラミは CCYV と同じクリニウイルスに属するキュウリ黄化病の病原ウイルス（BPYV）を半永続的に媒介する。

８．化学的防除技術

日本在来のバイオタイプ JpL については、強い殺虫剤抵抗性は報告されなかった。1989 年頃侵入したバイオタイプ B は、オンシツコナジラミに有効であった多くの有機リン剤、合成ピレスロイド剤に対して抵抗性を示したため、各種薬剤に対する感受性検定と新たな有効薬剤の探索が進められた（浜村，1999）。その結果、イミダクロプリド、ニテンピラムなどのネオニコチノイド系殺虫剤を中心とする新規薬剤が導入・登録され、タバココナジラミの防除に活用されるようになった。

しかし、最近日本で発生が確認されたバイオタイプ Q では、スペイン、イタリア、ドイツの個体群でネオニコチノイド系殺虫剤に対する高度の交差抵抗性が報告され、イスラエルでは殺虫剤ピリプロキシフェンに対する高度の抵抗性発達が示されている（Nauen et al., 2002：Horowitz et al., 2003）。日本で確認されたバイオタイプ Q の個体群についても、海外と同様に高い殺虫剤抵抗性を有していることが明らかにされつつある。今後はバイオタイプ Q に対して有効な薬剤を探索するとともに、抵抗性の発達しにくい気門封鎖型殺虫剤や、天敵に影響の少ない殺虫剤の効果的な使用方法を検討する必要があろう。

９．生物的防除技術

タバココナジラミに対しては、オンシツコナジラミを対象とした天敵寄生蜂オンシツツヤコバチ *Encarsia formosa* が利用できる。オンシツコナジラミとタバココナジラミが同時に発生している場合、オンシツツヤコバチがオンシツコナジラミを好んで寄生してしまい、タバココナジラミが逆に増加したという事例もあるが（松井・中島，1991）、オンシツツヤコバチはコナジラミ密度が高いとき寄主を選り好みするので、十分な数のオンシツツヤコバチをコナジラミの増殖開始時期から反復して放飼すれば、２種のコナジラミを同時に制御することができる（松井，1995b）。

また、タバココナジラミ専用の天敵寄生蜂チチュウカイツヤコバチ *Eretmocerus mundus* も市販されており、オンシツツヤコバチよりも優れた防除効果を発揮するとされている。

タバココナジラミに有効な微生物農薬として、ボーベリア・バシアーナ、バーティシリウム・レカニ、ペキロマイセス・フモソロセウスが有効で、登録市販されている。これら微生物農薬を効果的に使用するためには、感染に好適な温度と湿度条件を設定する必要がある。

１０．物理的防除技術

・黄色粘着板

アブラムシやコナジラミが黄色の色彩に誘引されることはよく知られている。さまざまな植物に寄生するタバココナジラミ（バイオタイプ B）成虫が黄色に強く誘引されるため、黄色粘着トラップはコナジラミ成虫が施設へ侵入するのを防ぐほか、発生個体数をモニタリングすることにより天敵放飼のタイミングを知ることができる（三宅ら, 1991：林, 1999）。

・近紫外線除去フィルム

タバココナジラミと天敵寄生蜂のいずれも、実験室条件では近紫外線を除去した環境を

避けることが知られている。しかし、近紫外線を除去した環境下でも、コナジラミ成虫は黄色粘着板に誘引され、天敵による寄生率も変化しないことが分かった（嶋田，1994：鹿島・松井，1998ab）。近紫外線除去フィルムの展張は害虫の侵入を防ぎ、施設内の昆虫の活動を抑制するが、昆虫の繁殖活動や寄生活動を完全に妨げるわけではない。

・光反射シート

温室内および外縁部に光反射シートを設置すると、タバココナジラミの侵入や繁殖を抑制することができる。下からの光反射によって、コナジラミの飛翔行動や繁殖行動が阻害されるためだと考えられている（長塚，2000）。

・防虫ネット

タバココナジラミ成虫の侵入を抑制するだけであれば、1mm メッシュのネットでも一定の効果が認められた（青木ら，1992）。しかし TYLCV を保毒したタバココナジラミ成虫の侵入を防止するためには、より細かな目合いのネットを開口部に展張する必要がある。タバココナジラミ成虫の通過を 80%以上阻止するためには、0.4mm 以下の目合いが必要であった（渡邊，2006）。しかし細かな目合いの防虫ネットを使用した場合、施設内の温度上昇による作業環境の悪化やトマトの生育に対する悪影響が問題となる。また、同じ目合いでも素材（糸の太さや織り方）によって空気の透過性が異なる場合もあるので、資材の選択にあたっては、タバココナジラミ成虫の通過率、ネットの空隙率、耐久性、価格などを勘案するとともに、他の防除技術との組み合わせも考慮して検討する必要がある。

１１．タバココナジラミとトマト黄化葉巻病の総合防除

タバココナジラミによる被害は、直接的な吸汁害よりもトマト黄化葉巻病などのウイルス病媒介が中心である。従ってタバココナジラミ自体を防除するよりも、ウイルスの伝染環を断ち切るような、総合的な管理技術が重要となる。

タバココナジラミは夏季には多くの種類の寄主植物で育ち、これら罹病トマト以外の植物で発育した大多数のコナジラミは病原ウイルス（TYLCV）を持たない無毒虫である。熊本県の調査によれば、雑草地で捕獲されたタバココナジラミ成虫はすべて無毒虫であり、罹病トマトの栽培施設内で捕獲された個体のみ保毒虫であった（長崎県総合農林試験場ほか，2004）。野菜茶業研究所が 2004 年に三重県北部のトマト栽培地帯で行った調査では、８月から 11 月にかけて野外に設置したトマト苗で捕獲されたタバココナジラミ成虫の TYLCV 保毒率は、全体で 10～15%以下という低い値であった（本多・北村，2005）。

大部分が無毒虫である野外のタバココナジラミ個体群を殺虫剤散布などによって徹底防除しても、TYLCV 保毒虫に対する防除効果は低い。むしろ保毒虫の発生源である罹病した野良生えトマトを除去し家庭菜園トマトで防除を行って保毒虫そのものを減らす方が、TYLCV に対する防除効果は高いと考えられる。また、トマト栽培終了時に株を抜根し、完全に枯死するまで施設を密閉する蒸し込み処理を行うことによって、保毒虫の施設外への脱出を阻止すると同時に病原ウイルスの野外への放出も防止することができる（古家，2006）。

施設開口部への防虫ネット展張や近紫外線除去フィルムの使用による保毒虫侵入の防止、定植時の粒剤処理等を組み合わせることによって、トマト黄化葉巻病の発生を効果的に抑制することができる（小川，2004：小川ら，2004）。また、防虫ネット展張と定植後の気門

封鎖剤および糸状菌製剤の散布によっても黄化葉巻病の発生を抑制できる（溝辺，2006）。こうした防除技術を基本として、黄色粘着板や黄色粘着テープによるコナジラミ成虫の捕殺や、春の施設内コナジラミ密度を抑制する天敵寄生蜂の利用など、各種の防除手段を効果的に組み合わせながら施設内外の保毒虫密度とウイルス量を減少させていくことが、トマト栽培地帯におけるトマト黄化葉巻病の流行防止につながると言えよう。野菜茶業研究所では、トマト黄化葉巻病の防除に関する技術指針（野菜茶研，2009）を取りまとめたので、参考にしていただきたい。

引用文献

安藤幸夫・林　英明（1992）タバココナジラミの寄主植物. 中国昆虫 6: 23-26

青木克典・下畑次夫・野村康弘（1992）岐阜県におけるタバココナジラミの発生と被覆資材による防除効果. 関西病虫研報 34: 55

Bellows Jr., T. S., T. M. Perring, R. J. Gill and D. H. Headrick（1994）Description of a species of *Bemisia* (Homoptera: Aleyrodidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 87: 195-206

古家　忠（2006）タバココナジラミ（バイオタイプ B）の高温耐性とハウス密閉処理による防除効果. 植物防疫 60: 544-546

浜村徹三（1999）各種散布薬剤に対するシルバーリーフコナジラミの薬剤感受性. 野菜茶試研報 14: 177-187

林　英明（1999）粘着板によるコナジラミ類の予察と防除. 植物防疫 53: 226-232

本多健一郎・北村登史雄（2005）シルバーリーフコナジラミが媒介するトマト黄化葉巻病の感染時期とコナジラミ密度，保毒率の関係. 第 49 回日本応用動物昆虫学会大会講要. 198

Horowitz, A.R., I. Denholm, K. Gorman, J. L. Cenis, S. Kontsedalov and I. Ishaaya（2003）Biotype Q of *Bemisia tabaci* identified in Israel. Phytoparasitica 31: 94-98

Iida, H., T. Kitamura and K. Honda (2009) Comparison of egg-hatching rate, survival rate and development time of the immature stage between B- and Q-biotypes of *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Homoptera: Aleyrodidae) on various agricultural crops. Appl. Entomol. Zool. 44: 267-273.

飯田博之・北村登史雄・本多健一郎・水澤靖弥・鎌田茂・大野徹・広瀬拓也（2009）タバココナジラミバイオタイプ Q の寄主範囲．関西病虫害研究会報 51：75-77.

Kakimoto, K., H. Inoue, T. Yamaguchi, S. Ueda, K. Honda and E. Yano (2007) Host plant effect on development and reproduction of *Bemisia argentifolii* Bellows et Perring (*B. tabaci* [Gennadius] B-biotype) (Homoptera: Aleyrodidae). Appl. Entomol. Zool. 42: 63-70

鹿島哲郎・松井正春（1998a）近紫外線除去フィルムがトマトの主要害虫およびその天敵の生存など活動に及ぼす影響. 関東病虫研報 45: 185-189

鹿島哲郎・松井正春 (1998b) 近紫外線除去フィルムが害虫およびその天敵に及ぼす影響. (2)

シルバーリーフコナジラミおよび天敵オンシツツヤコバチ、エレトモセルス・カリフォルニクスに及ぼす影響. 茨城農総セ園研研報 6: 37-41
北村登史雄・飯田博之・大西純・本多健一郎（2009）獲得吸汁時間に応じた Tomato yellow leaf curl virus 成虫保毒率とトマトへの媒介率の増加に関するタバココナジラミバイオタイプ B，Q 間の比較．関西病虫害研究会報 51：81-83.
Lee, M.L. and P.J. De Barro（2000）Characterization of different biotypes of *Bemisia tabaci* (Gennadius) (Homoptera; Aleyrodidae) in South Korea based on 16S ribosomal RNA sequences. Korean J. Entomol. 30: 125-130
松井正春（1993）タバココナジラミの最近における発生と防除. 植物防疫 47: 118-119
松井正春（1995a）タバココナジラミ新系統（仮称：シルバーリーフコナジラミ）の発生とその防除対策. 植物防疫 49: 111-114
松井正春（1995b）タバココナジラミとオンシツコナジラミの混在下におけるオンシツツヤコバチの密度抑制効果. 関西病虫研報 37: 15-16
松井正春・中島武彦（1991）タバココナジラミとオンシツコナジラミの共存下におけるオンシツツヤコバチの寄主選好性. 関西病虫研報 33: 93-94
三宅律幸・加藤昌章・山下重樹（1991）色彩の相違によるタバココナジラミの誘因効果について. 関西病虫研報 33: 84
宮武頼夫（1980）日本産コナジラミ類総目録. Rostria 32: 291-330
溝辺　真（2007）物理的・生物的防除による促成栽培トマトのタバココナジラミ対策. 今月の農業 51(3): 35-40
長崎県総合農林試験場・福岡県農業総合試験場・熊本県農業研究センター（2004）トマト黄化葉巻病の病原ウイルス及びシルバーリーフコナジラミの生態解明に基づく環境保全型防除技術の確立. 九州新技術地域実用化研究成果 No.47. 156pp
長塚　久（2000）光反射シートによるコナジラミ類およびアザミウマ類の行動抑制. 植物防疫 54: 359-362
Nauen, R., N. Stumpf and A. Elbert（2002）Toxocological and mechanistic studies on neonicotinoid cross resistance in Q-type *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) . Pest Manag. Sci. 58: 868-875
奥田充（2009）キュウリ，メロンの退緑黄化病の原因ウイルスと防除技術．今月の農業 53(2)：72-75.
Perring, T.P.（2001）The *Bemisia tabaci* species complex. Crop Protection 20: 725-737
小川恭弘（2004）物理的防除法によるコナジラミ類およびトマト黄化葉巻病の防除効果. 今月の農業 48(7): 58-62
小川恭弘・内川敬介・嶽本弘之・石井貴明・行徳　裕・古家　忠・江口武志（2004）植物ウイルス病研究会レポート 7: 111-120
大泰司誠・岡田忠虎（1996）タバココナジラミの防除に関する研究. 生理，生態の解明. 農林水産技術会議事務局. 研究成果 311: 8-24
嶋田知英（1994）近紫外線除去フィルムによるタバココナジラミの防除効果と作用機作. 関東病虫研報 41: 213-216
Ueda, S. and J. K. Brown（2006）First report of the Q biotype of *Bemisia tabaci* in Japan

by mitochondrial cytochrome oxidase I sequence analysis. Phytoparasitica. 34: 405-411

Ueda, S., T. Kitamura, K. Kijima, K.-I. Honda and K. Kanmiya（2009）Distribution and molecular characterization of distinct Asian populations of *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae) in Japan. J. Appl. Entomol. 133: 355-366

渡邊丈夫（2006）シルバーリーフコナジラミ対策の防虫ネット比較試験．今月の農業 50(10): 18-21

野菜茶業研究所（2009）トマト黄化葉巻病の防除に関する技術指針．http://vegetea.naro.affrc.go.jp/joho/index.html

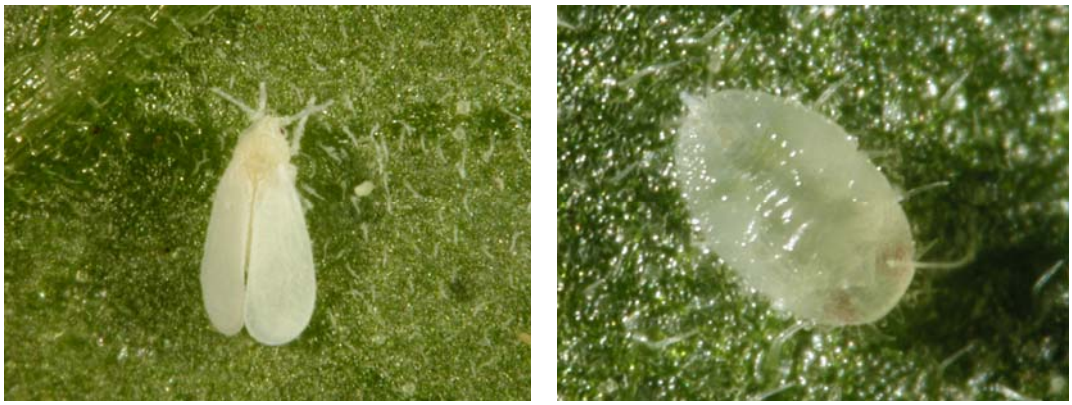


写真１　オンシツコナジラミの成虫（左）と幼虫（右）

写真２　タバココナジラミの成虫（左）と幼虫（右）

トマト黄化葉巻病抵抗性品種の現状と問題点

野菜茶業研究所
野菜育種研究チーム
斎藤新

１．トマト黄化葉巻病について

トマト黄化葉巻病は Tomato yellow leaf curl virus（TYLCV）によるウイルス病であり、タバココナジラミ（バイオタイプＢおよびＱ）により、媒介されるのが特徴である。病徴は初期に新葉の葉縁が退緑して黄化し、やがて、葉巻状になる（図 1)。病徴が進行すると成長点付近の葉が変形して縮葉となり、トマトの成長が著しく抑制されるため、収量が大幅に減少する。国内では 1996 年に静岡県、愛知県および長崎県で発生が確認され、急速に発生地域が拡大し、2009 年 1 月末現在で、東北地方南部以南の 34 都府県で発生が確認されている。国内においては、TYLCV-イスラエル系統と TYLCV-イスラエルマイルド系統が発生しており、発生当初は前者が九州地方で、後者が東海地方で確認されていた。近年、九州地方を除く地方では、双方のウイルス系統の混在が確認されている。病徴の特徴から、TYLCV-イスラエル系統を強毒系や激症型、TYLCV-イスラエルマイルド系統を弱毒系と表記している事例があるが、病徴は環境条件によっても異なるため、両者を病徴だけで判断することは困難である。一方で、トマト黄化葉巻病に類似した病害として、Tobacco leaf curl Japan virus（TbLCJV）によるトマト黄化萎縮病もあり、病徴のみでトマト黄化葉巻病と判断するのは難しい。後述するが、TYLCV の系統により、抵抗性反応が大きく異なる場合があることから、発生している TYLCV の系統を同定することは重要である。なお、TYLCV の系統は、PCR 等の分子生物学的な手法により、同定可能である。

図 1 トマト黄化葉巻病の病徴（初期）

２．トマト黄化葉巻病抵抗性素材について

トマト黄化葉巻病に対する強度抵抗性素材は栽培種である *Solanum lycopersicum*（*Lycopersicon esculentum*）では見つかっておらず（Nitzany, 1975)、複数のトマト近縁種より発見されている（表 1)。*S. pimpinellifolium*（*L. pimpinellifolium*）である LA121 の有する抵抗性は単因子による不完全優性と推定され、それを素材に育成された系統は TYLCV 感染時に病徴の発現が軽減するものの、生育が抑制され、収量が減少した（Pilowsky and Cohen, 1974)。*S. peruvianum*（*L. peruvianum*）である PI 126935 の有する抵抗性は劣性で複数の因子によると推定され（Pilowsky and Cohen, 1990)、本系統を用いて育成された「TY-20」では TYLCV 感染時に病徴の発現が抑制され、ウイルスの蓄積が軽減した（Rom et al., 1993)。異なる *S. peruvianum*（*L. peruvianum*）を用いて育成された「TY172」は

表1 トマト黄化葉巻病抵抗性素材および育成品種・系統

品種・系統名（素材系統名）	特徴	文献
S. pimpinellifolium（*L. pimpinellifolium*）		
LA 121	病徴の発現が軽減されるが、ウイルスの蓄積が確認される。	Pilowsky and Cohen, 1974
Hirsuto-INRA	抵抗性は優性で、単因子（*Tylc*）による。	Kasrawi, 1989
「Rty Azur」（Hirsuto-INRA）	RAPDマーカーによる解析では抵抗性遺伝子が第6染色体上に存在するが、*Ty-1*とは遺伝子座が異なる。	Kasrawi et al., 1998
S. peruvianum（*L. peruvianum*）		
LA385	接ぎ木による接種では病徴の発現が抑制される。	Chague et al., 1997
「TY-20」（PI 126935）	病徴の発現とウイルスの蓄積が軽減され、収量の減少も軽減される。	Rom et al., 1993
「M60」（PI 126935）	抵抗性は劣性の5つの因子による。	Pilowsky and Cohen, 1990
「TY172」（不明）	接ぎ木および保毒虫による接種では病徴の発現が抑制され、収量の減少は軽減される。	Friedmann et al., 1998
	抵抗性は少なくとも3つの主働遺伝子による。	Lapidot et al., 1997
	抵抗性遺伝子*Ty-5*が第4染色体上に、微動遺伝子が第1、7、9および11染色体上に存在する。	Anbinder et al., 2009
S. chilense（*L. chilense*）		
LA1969	不完全優性の主働遺伝子*Ty-1*が第6染色体上に存在し、2つの修飾遺伝子が第3染色体上と第7染色体上に存在する。病徴の発現が抑制され、ウイルスの蓄積が軽減される。	Zamir et al., 1994
	抵抗性遺伝子*Ty-4*が第3染色体上に存在する。	Ji et al., 2009
LA2779	*Ty-1*近傍に抵抗性遺伝子*Ty-3*が存在する。	Ji et al., 2007b
LA2779, LA1932	抵抗性遺伝子*Ty-3*（抵抗性素材：LA2779）および*Ty-3a*（抵抗性素材：LA1932）に連鎖したDNAマーカーP6-25を開発した。	Ji et al., 2007a
S. habrochaites（*L. hirsutum*）		
LA386	抵抗性は優性の1つ以上の遺伝子による。	Hassan et al., 1984
「902」（LA386, LA1777）	抵抗性は優性の主働遺伝子と2～3の劣性遺伝子による。	Vidavsky and Czosnek, 1998
「H24」（B6013）	抵抗性遺伝子*Ty-2*が第11染色体上に存在する。	Hanson et al., 2000
S. cheesmaniae（*L. cheesmanii*）		
LA1401	抵抗性は劣性である。	Hassan et al., 1984

接ぎ木による接種試験において、病徴の発現が抑制され、収量の減少も少なかった（Friedmann et al., 1998; Lapidot et al., 1997)。また、「TY172」は抵抗性遺伝子 *Ty-5* が第 4 染色体上に、微動遺伝子が第 1、7、9 および 11 染色体上に存在すると報告されている（Anbinder et al., 2009)。 *S. chilense*（*L. chilense*）である LA1969 では不完全優性の抵抗性遺伝子 *Ty-1* が第 6 染色体上に存在すると報告され（Zamir et al., 1994)、抵抗性遺伝子 *Ty-4* が第 3 染色体上に存在すると報告されている（Ji et al., 2009)。また、LA2779 では *Ty-1* 近傍に抵抗性遺伝子 *Ty-3* が存在すると報告され（Ji et al., 2007b)、抵抗性遺伝子 *Ty-3*（抵抗性素材：LA2779）および *Ty-3a*（抵抗性素材：LA1932）に連鎖した DNA マーカー、P6-25 が公表されている（Ji et al., 2007a)。*S. habrochaites*（*L. hirsutum*）である B6013 を用いて「H24」が育成され、抵抗性遺伝子 *Ty-2* が第 11 染色体上に存在すると報告されている（Hanson et al., 2000)。この他に *S. cheesmaniae*（*L. cheesmanii*）においても素材が見出されている（Hassan et al., 1984)。

虫に対する抵抗性としては毛茸による物理的障壁により、タバココナジラミとの接触（吸汁）を阻害し、タバココナジラミの増殖を抑制する素材が見出され、*S. peruvianum*（*L. peruvianum*）および *S. habrochaites*（*L. hirsutum*）では抑制効果が高かったが、これらと栽培種との交雑後代では抑制効果が低下した（Channarayappa et al., 1992)。

このようにトマト黄化葉巻病抵抗性に関する複数の素材が見出されており、抵抗性遺伝子は複数存在すると考えられる。今後はそれぞれの素材の抵抗性程度を評価するとともに、より強度の抵抗性を安定的に発現させるために遺伝子の集積を図ることも重要と考えられる。

３．トマト黄化葉巻病抵抗性品種について

国内で栽培されているトマト黄化葉巻病抵抗性品種の数は、販売中止となったものを含めると 30 以上である。抵抗性遺伝子 *Ty-1*、*Ty-2* および *Ty-3*（*Ty-3a*）について、それぞれの抵抗性遺伝子に連鎖した DNA マーカー、JB-1（Pérez de Castro et al., 2007)、TG0302（Garcia et al., 2007）および P6-25（Ji et al., 2007a）を用いて、抵抗性品種が有する抵抗性遺伝子を調査した。これら DNA マーカーで判断する限り、今回調査した 14 品種は抵抗性遺伝子 *Ty-1*、*Ty-2* および *Ty-3* もしくは *Ty-3a* のいずれか１つもしくは２つを有すること、特に *Ty-1* および *Ty-3a* を有する品種と *Ty-2* だけを有する品種の割合が高いことが明らかになった（表 2)。

表2　抵抗性品種が保有すると考えられる抵抗性遺伝子

保有すると考えられる抵抗性遺伝子	抵抗性品種数
Ty-1 および *Ty-3*	2
Ty-1 および *Ty-3a*	6
Ty-3a	1
Ty-2	5

また、抵抗性遺伝子 *Ty-2* を有する品種は TYLCV-イスラエル系統に対しては強い抵抗性を示すが、TYLCV-イスラエルマイルド系統に対して抵抗性を示さないので（斎藤ら、2008)、TYLCV-イスラエルマイルド系統が発生している地域において抵抗性品種を導入する場合は、その品種が有する抵抗性遺伝子を種苗会社等に確認してから栽培する必要がある。また、抵抗性遺伝子 *Ty-1* および *Ty-3* を有する品種は、TYLCV に感染すると高温条件下では植物体中のウイルスが急激に増殖し、発病するので（斎藤ら、2009b)、抑制栽培等、高温期にかかる時期の栽培では注意が必要である。

より強度の抵抗性を示すと考えられる *S. peruvianum* （*L. peruvianum*）が有する抵抗性遺伝子の利用も検討されているが、現在のところ、品種の育成には至っていない。いずれの抵抗性素材も TYLCV の増殖を完全には抑制できず、TYLCV に感染すると、発病しなくても植物体中で TYLCV が増殖する。このため、TYLCV に感染した抵抗性品種は罹病性品種と同様に感染源となり得るので、注意が必要である。

こうしたことから、抵抗性品種であっても、罹病性品種の栽培時と同様に、目合い 0.4mm 以下の防虫ネットを栽培施設のすべての開口部に展張してタバココナジラミの侵入を防ぐ等の物理的防除や薬剤による防除を併用し、TYLCV の感染を可能な限り防ぐことが望ましい。

現在市販されている抵抗性品種は海外で育成された品種をそのまま導入した品種や日本向けに改良された品種など、様々存在している。これらの抵抗性品種を導入する場合はトマト黄化葉巻病以外の病虫害抵抗性が国内で発生している病虫害のレース等に対応していない場合もあるため、生産現場で試作した上で、導入するようにしたい。

４．トマト黄化葉巻病抵抗性育種の今後について

抵抗性育種は世界各地で精力的に行われ，素材の検索も行われているが、現在のところ、ウイルスの増殖を完全に抑制する素材は見つかっていない。当研究所も抵抗性素材の検索を行い、ウイルスの増殖を強く抑制する素材を発見したが（斎藤ら、2009a)、完全に抑制する素材ではなかった。今後はこの素材の抵抗性を栽培種に導入するとともに、さらにウイルス増殖を抑制する抵抗性素材の検索を継続する予定で、遺伝子組換え技術を利用した強度抵抗性の付与も視野に入れている。また、既存の抵抗性品種・系統の抵抗性程度を評価し、抵抗性遺伝子の集積による、より強度な抵抗性を持つ育種素材の開発に取り組む必要があると考えている。

引用文献

Anbinder, I., M. Reuveni, R. Azari, I. Paran, S. Nahon, H. Shlomo, L. Chen, M. Lapidot, I. Levin. 2009. Molecular dissection of *Tomato leaf curl virus* resistance in tomato line TY172 derived from *Solanum peruvianum*. Theor. Appl. Genet. 119: 519-530

Chague, V., J. C. Mercier, M. Guenard, A. de Courcel and F. Vedel. 1997. Identification of RAPD markers linked to a locus involved in quantitative resistance to TYLCV in tomato by bulked segregant analysis. Theor. Appl. Genet. 95(4): 671-677.

Channarayappa, G. Shivashankar, V. Muniyappa and R. H. Frist. 1992. Resistance of *Lycopersicon* species to *Bemisia tabaci*, a tomato leaf curl virus vector. Can. J. Bot. 70(11): 2184-2192.

Friedmann, M., M. Lapidot, S. Cohen and M. Pilowsky. 1998. A novel source of resistance to tomato yellow leaf curl virus exhibiting a symptomless reaction to viral infection. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 123(6): 1004-1007.

Garcia, B. E., E. Graham, K. S. Jensen, P. Hanson, L. Mejía and D. P. Maxwell. 2007. Co-dominant SCAR marker for detection of the begomovirus-resistance *Ty-2* locus derived from *Solanum habrochaites* in tomato germplasm. Tomato Genetic

Cooperative Report 57: 21-24.

Hassan, A. A., H. M. Mazayd, S. E. Moustafa, S. H. Nassar, M. K. Nakhla and W. L. Sims. 1984. Inheritance of resistance to tomato yellow leaf curl virus derived from *Lycopersicon cheesmanii* and *Lycopersicon hirsutum*. Hortscience. 19(4): 574-575.

Hanson, P. M., D. Bernacchi, S. Green, S. D. Tanksley, V. Muniyappa, A. S. Padmaja, H. Chen, G. Kuo, D. Fang and J. Chen. 2000. Mapping a wild tomato introgression associated with tomato yellow leaf curl virus resistance in a cultivated tomato line. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 125(1): 15-20.

Ji, Y., M. S. Salus, B. van Betteray, J. Smeets, K. S. Jensen, C. T. Martin, L. Mejía, J. W. Scott, M. J. Havey and D. P. Maxwell. 2007a. Co-dominant SCAR Markers for Detection of the *Ty-3* and *Ty-3a* Loci from Solanum chilense at 25 cM of Chromosome 6 of Tomato. Tomato Genetic Cooperative Report 57: 25-28.

Ji, Y., D.J. Schuster, and J.W. Scott. 2007b. *Ty-3*, a begomovirus resistance locus near the *tomato yellow leaf curl virus* resistance locus *Ty-1* on chromosome 6 of tomato. Mol. Breed. 20: 271-284.

Ji, Y., J.W. Scott, and D.J. Schuster. 2009. Molecular mapping of *Ty-4*, a new tomato yellow leaf curl virus resistance locus on chromosome 3 of tomato. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 134: 281-288.

Kasrawi, M. A. 1989. Inheritance of resistance to tomato yellow leaf curl virus (TYLCV) in *Lycopersicon pimpinellifolium*. Plant Dis. 73(5): 435-437.

Kasrawi, M. A., M. A. Suwwan and A. Mansour. 1998. Sources of resistance to tomato-yellow-leaf-curl-virus (TYLCV) in *Lycopersicon* species. Euphytica. 37(1): 61-64.

Lapidot, M., M. Friedmann, O. Lachman, A. Yehezkel, S. Nahon, S. Cohen and M. Pilowsky. 1997. Comparison of resistance level to tomato yellow leaf curl virus among commercial cultivars and breeding lines. Plant Dis. 81(12): 1425-1428.

Nitzany, F. E. 1975. Tomato yellow leaf curl virus. Phytopath. Medit. 14(2-3): 127-129.

Pérez de Castro, A., J. M. Blanca, M. J. Díez and F. N. Viñal. 2007. Identification of a CAPS marker tightly linked to the Tomato yellow leaf curl disease resistance gene *Ty-1* in tomato. Eur. J. Plant Pathol. 117: 347-356.

Pilowsky, M. and S. Cohen. 1974. Inheritance of resistance to tomato yellow leaf curl virus in tomatoes. Phytopathology. 64(5): 632-635.

Pilowsky, M. and S. Cohen. 1990. Tolerance to tomato yellow curl virus derived from *Lycopersicon peruvianum*. Plant Dis. 74(3): 248-250.

Rom, M., Y. Antignus, D. Gidoni, M. Pilowsky and S. Cohen. 1993. Accumulation of tomato yellow leaf curl virus DNA in tolerant and susceptible tomato lines. Plant Dis. 77(3): 253-257.

斎藤新・齊藤猛雄・松永啓・山田朋宏. 2008. Real-time PCR 法を利用した TYLCV の定量に

よるトマト黄化葉巻病抵抗性品種の抵抗性評価. 園学研. 7(別 1)：107.

斎藤新・齊藤猛雄・松永啓. 2009a. Real-time PCR 法を利用した TYLCV の定量によるトマト類遺伝資源からの黄化葉巻病抵抗性素材の検索. 園学研. 8(別 1)：103.

斎藤新・齊藤猛雄・松永啓. 2009b. トマト黄化葉巻病抵抗性品種が発病する温度条件の検討. 園学研. 8(別 2)：(in press)

Vidavsky, F. and H. Czosnek. 1998. Tomato breeding lines resistant and tolerant to tomato yellow leaf curl virus issued from *Lycopersicon hirsutum*. Phytopathology. 88(9)：910-914.

Zamir, D., I. Ekstein-Michelson, Y. Zakay, N. Navot, M. Zeidan., M. Sarfatti, Y. Eshed, E. Harel, T. Pleban, H. van-Oss, N. Kedar, H. D. Rabinowitch and H. Czosnek. 1994. Mapping and introgression of a tomato yellow leaf curl virus tolerance gene, *TY-1*. Theor. Appl. Genet. 88(2)：141-146.

アザミウマ類および媒介ウイルス病の発生生態と防除対策

野菜茶業研究所
野菜IPM 研究チーム
北村登史雄

ミナミキイロアザミウマ、ミカンキイロアザミウマを代表とするアザミウマ目に属する害虫は体長が1～2mm程度と小さく蕾や新芽などの間隙を好むため低密度の場合は発見が困難である。高度に発達した殺虫剤抵抗性により非常に防除が難しい。また、直接の吸汁による加害だけでなく、TSWVなどのウイルス病を媒介するために多くの野菜において重要な害虫となっている。さらに農業現場で問題となっているアザミウマは広食性のものが多く、野菜、花き、果樹で同一種のアザミウマが加害していることがある。このため、アザミウマの発生による経済的損失の少ない作物の防除が手薄になり、そこが発生源となっていることがある。

ウイルス媒介虫としてアザミウマ類の防除はその媒介効率の高さから要防除密度が極めて低く、従来の殺虫剤のみによる防除は非常に難しく、生物的、物理的そして殺虫剤を用いた化学的な防除手段を組み合わせて行う必要があろう。本稿では主要なアザミウマ類の害虫とそれらが媒介するウイルス病の概要、そしてその防除法について解説する。

アザミウマ類の見分け方

アザミウマ類は非常に微小であるため、肉眼での種の同定は難しい。しかし、種により殺虫剤に対する感受性が異なるために種を特定することは重要である。形態により種を同定するためには圃場等で採取したアザミウマ類をホイヤー氏液等でスライドグラスに封入してプレパラート標本を作製し、50倍以上の実体顕微鏡下での観察により刺毛の場所や数などで判別する。その他、粘着トラップに誘殺されたアザミウマ類の簡易な同定法として触角の節数や各節の色彩により判別することが出来る。

しかしながら幼虫などでは形態による種の同定は不可能であるため、近年PCR-RFLP法などのDNA多型による判別も開発されている。

圃場現場では、発生作物と被害の様子から種を推定することになる。施設栽培で最も重要な害虫であるミナミキイロアザミウマとミカンキイロアザミウマについては後の項で詳しく解説する。

アザミウマ類の発生と生態

1.ミナミキイロアザミウマ　*Thrips palmi*

ミナミキイロアザミウマは1987 年に宮崎県のピーマンで初めて発生が確認された侵入害虫で，1993 年には東北，北陸の一部を含む40 都府県で確認される全国に分布を拡大した。ミナミキイロアザミウマの寄主範囲は非常に広く，ナス科、ウリ科、キク科など34 科

117種に及んでいる。生活史は成虫が卵を植物内に生み付け、ふ化した幼虫が植物を摂食加害する。1 齢幼虫、2 齢幼虫を経て、土中または植物上で蛹化する。第1 蛹、第2 蛹を経て羽化して成虫となる。各ステージの発育速度は速く、世代当たりの日数は25℃で14～18日、30℃で12～13 日であるが35℃では発育が完了しない。宮崎県などの西南地方では野外で11 世代、施設も併せると年間20 世代を超えると予想される。また、成虫の寿命は25℃で27 日間、30℃で18 日間であり、雌成虫は成虫期間中に不規則に産卵し、20～25℃で82～94 個産卵する。越冬は西南諸島を除くと、野外ではほとんど不可能でもっぱら施設内において行われる。4～5 月から施設からの飛び出し虫が発生源となり、圃場や周辺雑草で増殖したアザミウマが野菜圃場や施設に飛び込み、加害が始まる。この飛び込みは西南暖地の場合12月程度まで続く。

2.ミカンキイロアザミウマ　*Frankliniella occidentalis*

ミカンキイロアザミウマは1990 年に千葉県と埼玉県から初めて発生が確認された侵入害虫で、侵入後急速に日本全国に分布を広げた。本種の寄主範囲は広く、北米だけで200 種以上の寄主が知られている。雌成虫の体長は1.5 ㎜程度でアザミウマとしては比較的大型である。 1 世代に要する期間は20℃で約20 日と短く、一雌当たりの産卵数は150～300 個である。低温耐性が強く、日本の野外でも越冬が可能だと考えられている。一方、高温に対する耐性は比較的低く45℃以上の気温では生存できないこと35℃以上で増殖が抑制される。本種が十分に産卵するためには花粉の摂取が必要であるために、花に対する選好性が強く、そのために花き類では花弁に被害が集中する。花弁にカスリ状の白斑が生じるため、著しく商品価値が低下する。その他、野菜類での被害はトマト、オクラの白ぶくれ症、インゲン、エンドウの火ぶくれ症、イチゴでは果実の褐変や奇形果の発生である。

3.ネギアザミウマ　*Thrips tabaci*

ネギアザミウマは全世界的に分布するアザミウマで広範な作物に寄生・加害している。日本でも北海道から沖縄まで発生が確認されておりアザミウマ類の害虫の中で最も広く分布していると考えられている。越冬は非休眠の成虫がネギやタマネギなどの栽培作物やノビルなどの雑草で行う。西南暖地では一部幼虫で行っている報告がある。野外では気温が10℃を超えるとタマネギなどの新しい寄主に飛び込み、増殖をはじめる。6～8 月をピークに10 月程度まで発生する。

本種による被害として葉に対する直接の吸汁によりかすり状の白斑が生じる。特に葉ネギ等の葉が直接商品となる作物では少ない被害でも著しく商品価値を下げる。また、密度が高いときは葉が曲がり、新芽の加害により伸長不良となる。西日本のタマネギ栽培においては本種の加害による直接的な減収が軽微なため、防除が手薄となり、発生源となる可能性がある。アスパラガスでは出荷後に茎頂部に潜んでいた成虫が脱出して消費者からクレームを受けることがある。

4.ヒラズハナアザミウマ　*Frankliniella intonsa*

ヒラズハナアザミウマはミカンキイロアザミウマと同族のアザミウマである。本種は土着の害虫であり、ミカンキイロアザミウマほどの殺虫剤に対する抵抗性は発達していない。その発生消長は春から秋にかけて植物の花に多く見られる。野外で花の少なくなる8 月には発生が少なくなる傾向がある。冬季は成虫が落下した花や枯れ葉の間で越冬する。

本種はミカンキイロアザミウマと同様に花に生息することが多いため、その被害は花および果実に集中している。トマト、オクラの白ぶくれ症、インゲン、エンドウの火ぶくれ症、イチゴ果実の褐変や奇形の発生、そして花き類での花弁の損傷等が知られている。

被害から見るミナミキイロアザミウマとミカンキイロアザミウマの見分け方

アザミウマ類で最も問題となるミナミキイロアザミウマとミカンキイロアザミウマでは被害の発生の様子が異なる。ナスの場合、ミナミキイロアザミウマでは葉脈に沿って食害痕がみられる果実では筋状のケロイド状の被害痕が発生する。ミカンキイロアザミウマでは葉脈に限らず、カスリ状の白色斑点となり、しだいに光沢を帯びて銀色に光る（シルバリング）。果実では果頂部に円形状の脱色斑点が生じ、症状がひどい場合は果頂部全体が着色不良になる。

ピーマンのミナミキイロアザミウマによる被害は果実に褐色のケロイド状の傷や傷を中心とした奇形果が発生する。葉では汁を吸われた部分の色が白く抜け、光を反射して銀色に光る。ミカンキイロアザミウマによる被害は果実上部が褐色に変色する。新芽の萎縮、葉のかすれが生じる。

キュウリのミナミキイロアザミウマによる被害は果梗部、果実の基部にケロイド状の被害痕が生じ、葉では吸汁された部分の色が抜ける。ミカンキイロアザミウマによる被害は果実のケロイド状の傷や葉のシルバリングが発生する。

また、トマト、イチゴではミカンキイロアザミウマの発生が見られるが、ミナミキイロアザミウマは発生しない。

アザミウマ類の媒介するウイルス病

アザミウマ類が媒介する植物ウイルスは1本鎖RNAからなるトスポウイルス属に属するウイルスである。世界では13種が報告されており、日本国内では7種のトスポウイルスの発生が確認されている。種子伝染や花粉伝染はしない。実験的には感染植物の磨砕液等により汁液伝染が出来るが、磨砕液中でのウイルスの安定性が低く、室温では2～5時間で感染性を失うため、圃場での接触伝染や汁液伝染の可能性は低い。このため、その伝染はもっぱらアザミウマ類の媒介によると考えられる。アザミウマは1齢幼虫が感染植物を吸汁したときにのみウイルスを獲得し、その後、成虫になった後に媒介することが出来る。つまり、たとえ成虫は感染植物を吸汁してもウイルス媒介能を獲得することは出来ないのである。また、経卵伝染もしない。ウイルスの診断には血清学的診断と遺伝子診断が主に用いられる。血清学的診断はウイルスを抗原とした抗血清を用いた抗原・抗体反応を利用する診断

法であるが、診断精度が高く、簡便且つ安価に診断することが出来る。主要なトスポウイルスに対しては特異的抗体を利用した診断キットが日本植物防疫協会などから市販されている。また、TSWVとINSVについてはRIPA法による診断キットも発売されており、日本では和光純薬から入手できる。RIPA法はDAS-ELISA法と比較して感度は劣るものの、検体植物の磨砕液に試験紙を浸し、5～10後に診断することが出来るため、圃場等における簡易診断に有効である。

以下に代表的な2種のトスポウイルスによる病害を解説する。

表 1. 日本での発生が報告されているトスポウイルス

ウイルス名	略称	感染作物	媒介するアザミウマ類
Tomato spotted wilt virus	TSWV	トマト、ピーマン、ナス、ダリア、キク、ガーベラ、シネラリア、マリーゴールドアルストロメリアなど	ダイズウスイロアザミウマ、ネギアザミウマ、ヒラズハナアザミウマ、ミカンキイロアザミウマ、チャノキイロアザミウマ
Watermelon silver mottlevirus	WSMoV	スイカ、トウガン、ニガウリ、キュウリ	ミナミキイロアザミウマ
Melon yellow spot virus	MYSV	メロン、キュウリ	ミナミキイロアザミウマ
Inpatiens necrotic spot virus	INSV	シネラリア、シクラメン	ミカンキイロアザミウマ、ヒラズハナアザミウマ
Iris yellow spot virus	IYSV	アルストロメリア、トルコギキョウ	ネギアザミウマ
Capsicum chlorosis virus	CaCV	ピーマン	アザミウマ類（種名の報告無し）
Chrysanthemum stem necrosis virus	CSNV	キク	ミカンキイロアザミウマ

1. トマト黄化えそ病　TSWV

*Tomato spotted wilt virus*により引き起こされるウイルス病で多くの植物に感染する。ナス科、キク科及びマメ科で被害が大きく、レタスでも発病の記録がある。トマトでは葉の褐色のえそ斑、茎や葉柄のえそ条斑等の病徴が発生する。また、果実にもえそ斑を生じる。日本では1972年に岡山県のダリアで初確認され、1990年代に西日本を中心にトマトで大発生し、問題となっていたが、近年はキク等花き類を生産している産地で発生している。TSWVを媒介するのはネギアザミウマ、ヒラズハナアザミウマ、ダイズウスイロアザミウマ、チ

ャノキイロアザミウマ、ミナミキイロアザミウマ等のアザミウマ類である。TSWVに対する抵抗性品種は日本国内の種苗会社からは発売されていないが、ヨーロッパでは上市されており、今後国内でも抵抗性品種の利用は有効な手段となると思われる。

2．キュウリ（メロン）黄化えそ病　MYSV

*Melon yellow spot virus*により引き起こされるウイルス病でウリ科植物に感染する。MYSVに感染した植物は葉にえそ斑、退緑斑、モザイク、黄化などの病徴が発生し、最終的には枯死する。キュウリでは果実にモザイクが発生することもあるが、収量の低下が最も問題となる。日本では1992年に静岡県の温室メロンで初確認され、1995年に高知県のキュウリ、その後スイカ及びニガウリで発生が確認されている。現在では九州、四国全域、和歌山県奈良県、三重県、愛知県、静岡県、神奈川県、埼玉県、群馬県等で発生している。キュウリに対する病原性が高く、日本のキュウリ栽培で最も問題となっているウイルス病の一つである。MYSVを媒介するのはミナミキイロアザミウマであるが、室内試験ではヒラズハナアザミウマによる媒介も確認されている。MYSVに対する抵抗性品種は現在存在せず、現在研究中である。

アザミウマ類の防除

アザミウマ類の媒介するウイルス病は一度罹病すると治療は出来ないため、その防除は感染防止のためにその媒介虫であるアザミウマの防除が中心となる。アザミウマ類の防除において種により有効な殺虫剤が異なるために発生しているアザミウマを同定することは重要である。しかし、アザミウマ類は微小であるために圃場での判別が難しいため、殺虫剤の抵抗性とは無関係の天敵昆虫等の生物的防除資材、ネットや紫外線カットフィルム等の物理的防除資材の併用が望ましい。

1.物理的資材

アザミウマ類の害虫に対する物理的防除資材としては施設開口部の防虫ネットによる被覆、シルバーマルチの利用、また紫外線カットフィルムの施設への被覆などが挙げられる。開口部の防虫ネットの被覆は目合の小さいもの、毛羽だったもの、さらに銀色寒冷紗で効果が高い。施設の被覆資材として紫外線を通さない紫外線カットフィルムを用いるとアザミウマの密度が低下し、被害が減少する。これは紫外線カットフィルムを被覆した施設ではアザミウマの侵入が抑制され、移動が制限され、定着が悪くなることが密度低下の原因と考えられている。

2. 生物農薬

現在アザミウマに類に登録のある生物農薬は8剤でその内訳は天敵昆虫3剤、天敵ダニ剤3剤、微生物製剤2剤である。高知県などでアザミウマ類がキーペストとなるナスやピーマンの施設栽培において利用されている。天敵農薬全般に当てはまることであるが、高い防除

効果を求めるにはアザミウマが低い密度の時に放飼する必要がある。また、生物農薬に影響のある殺虫剤との併用は出来ない。このために対象外の害虫の侵入を防ぐ意味でも施設開口部に防虫ネットの設置が望ましい。

表 2. アザミウマ類に対して登録のある生物農薬

剤名	対象作物	対象病害虫
天敵昆虫・ダニ製剤		
アリガタシマアザミウマ剤	野菜類（施設栽培）	アザミウマ類
ナミヒメハナカメムシ剤	ピーマン（施設栽培）	ミカンキイロアザミウマ ミナミキイロアザミウマ
タイリクヒメハナカメムシ剤	野菜類（施設栽培）	アザミウマ類
ククメリスカブリダニ剤	野菜類（施設栽培） シクラメン（施設栽培）	アザミウマ類
デジェネランスカブリダニ剤	野菜類（施設栽培）	アザミウマ類
スワルスキーカブリダニ剤	野菜類（施設栽培） 豆類（種実）・（施設栽培） いも類（施設栽培） なす（施設栽培）	アザミウマ類 タバココナジラミ チャノホコリダニ
微生物製剤		
バーティシリウム　レカニ水和剤	きく（施設栽培）	ミカンキイロアザミウマ
ボーベリア　バシアーナ乳剤	野菜類	アザミウマ類

ヒメハナカメムシ類

現在、ナスやピーマンの施設栽培で最も利用されているのが、ヒメハナカメムシ類である。殺虫剤の散布の少ない路地ナスではアザミウマが発生するとヒメハナカメムシ類が周辺の雑草から飛び込んでアザミウマを捕食することがあり、このヒメハナカメムシ類を天敵製剤として利用したものがナミヒメハナカメムシ剤およびタイリクヒメハナカメムシ剤である。ナミヒメハナカメムシ剤が最初に開発され、1989 年に登録されたが、この天敵は短日条件下では産卵できないために、冬季の施設栽培では利用できない。このため現在では、短日条件下でも産卵が可能なタイリクヒメハナカメムシ剤に置き換わっている。

タイリクヒメハナカメムシは広食性の昆虫でアザミウマ、ダニ、アブラムシを食べることが知られているが、特にアザミウマの幼虫に対する選好性が強い。好適条件では1 日当たり約50 頭のアザミウマの幼虫を補食する。

ククメリスカブリダニ

　ククメリスカブリダニはアザミウマやハダニを捕食するが、アザミウマの場合はその体サイズから1 齢幼虫のみを摂食することが出来る。また、卵も植物体内に産卵されるために捕食できない。しかし、アザミウマやハダニ以外にも花粉等の摂食により生存することが出来るため、アザミウマ密度が非常に低い場合でも待ち伏せ型天敵として利用できる。本種の雌成虫は好適条件下で1日当たりミナミキイロアザミウマの幼虫を1.3頭捕食することが出来る。

スワルスキーカブリダニ

　スワルスキーカブリダニは2008年に上市された新しい天敵生物で、アザミウマ類の他、コナジラミ類、チャノホコリダニに対して登録されている。トマトでの定着が悪く、使用出来ないが、キュウリやナス、ピーマンなどでアザミウマ類などに対して高い防除効果を持つことが報告されている。

葉菜類で問題となるハモグリバエ類の発生生態と防除対策

野菜茶業研究所
企画管理部業務推進室
武田光能

はじめに

野菜と総称される作物の種類は非常に多く、それぞれの野菜や地域に応じて多くの作型がみられるため、害虫の総合防除（IPM）も季節や作型によって異なり、個々の野菜作に応じた防除体系が必要となる。また、新たに開発された防除手段を導入する場合やこれまでにみられなかった侵入害虫の発生、さらに潜在害虫の顕在化によっても防除体系の見直しが必要となる。

野菜を加害するハモグリバエ類には、古くからエンドウハモグリバエという呼ばれるナモグリバエ *Chromatomyia horticola* (Goureau)が知られている。本種は、エンドウの害虫として著名であったが、1990 年代以降から各地で発生が増加し、レタスや各種アブラナ科野菜の害虫として問題となっており、長野県のレタス、関東地域、特に三浦半島のダイコンで重要害虫となっている。ネギ属の葉菜類であるネギ、ニラ、ラッキョウ等を加害するハモグリバエ類として日本では古くからネギハモグリバエ *Liriomyza chinensis* Kato が発生している。ネギハモグリバエは京都府内のネギ栽培地帯や四国、九州のネギ栽培地域で発生が増加しネギ生産の阻害要因として問題となっている。

さらに、海外からの侵入害虫であるアシグロハモグリバエ *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard)は、マメハモグリバエ *Liriomyza trifolii* (Burgess)やトマトハモグリバエ *Liriomyza sativei* Blanchard と同様に中南米原産で広い寄主範囲を持ち、薬剤抵抗性を発達させた個体群の人為的な分布拡大により、世界中で多くの農作物に被害を与えている。アシグロハモグリバエは 2001 年に北海道の胆振支庁管内の農家で発見され（岩崎ら、2004）、北海道においてはアカザ科のホウレンソウやテンサイが主要な加害作物となっている。ホウレンソウではマメハモグリバエの加害が報告されているが、トマトハモグリバエやその他のハモグリバエによる加害事例はないとされている。

一方、果菜類を加害するハモグリバエ類として侵入害虫であるマメハモグリバエ、トマトハモグリバエや土着のナスハモグリバエ *Liriomyza bryoniae* (Kaltenbach)が著名である。トマトハモグリバエは 1999 年に沖縄県、山口県、京都府で発生が確認された（岩崎ら、2000）。その後、トマトハモグリバエは急速にその分布を拡大し、2004 年には 38 都府県に発生し、2008 年の岩手県を加えて 39 都府県に発生を拡大している。また、キュウリ、トマト、ナスの主要な果菜類においてマメハモグリバエとナスハモグリバエが減少し、トマトハモグリバエが各地で優占種となっている（徳丸・阿部、2003; 徳丸ら、2005; Tokumaru and Abe, 2005）。

ここでは、主に葉根菜類で問題となるナモグリバエを中心にその発生生態と防除対策について考察する。

直接害と間接害の被害許容密度

害虫が作物を加害する様式はさまざまで、食植性昆虫であればその分類群にしたがって咀嚼性口器、吸汁性口器、舐食性口器等の相違によって大きく異なっている。また、植物の被害自体は、植物に対する吸汁や食害などの直接害とウイルスの伝播やすす病の

発生などの間接害に分けられる。昆虫の摂食等が農作物に被害をもたらすのは、資源を巡る人間との競争であり、この意味では収穫対象物への加害が直接害となる。このような観点からは、収穫対象物を加害される場合を直接害とし、収穫物以外の部位を加害され、間接的に収穫対象物に被害が現れる場合を間接害とすることができる。

ハモグリバエ類による被害は、成虫が産卵管を葉組織に刺入することによって葉の表面に直径 1 mm 程度の白斑を生じる。この行動は、葉組織内に産卵する場合と産卵はせずに刺入部から滲出する汁液を摂取する場合がみられる。一方、ハモグリバエ類の幼虫は食入性であり、ふ化幼虫は葉肉内に潜入して葉肉を食害し潜入孔を拡大しながら発育する。これらの潜入痕によって被害が生じ、著しい場合は葉の白変による落葉となる。

ハモグリバエ類による果菜類の被害は、収穫対象物である果実には直接的な被害はみられず、光合成能の低下や樹勢低下が果実品質や果実収量等に間接的に影響を及ぼすことによって生じる。例えば、トマトを加害するマメハモグリバエの被害は間接害となり、果実収量が 10%減収する密度を要防除密度とすれば、トマトのマメハモグリバエでは株当たり幼虫 30 匹といった数字になる（JPP-NET）。これに対して、葉菜類のコマツナやチンゲンサイのハモグリバエ類による幼虫潜入痕は直接害となり、成虫による産卵管の挿入痕も収穫対象物の品質低下をもたらす直接害となり、葉菜類では収穫対象物である葉の加害が直接的に品質低下につながるため要防除密度は非常に低く設定されることになる。一方、ダイコン等の根菜類では葉付きダイコンを除けばハモグリバエ類の加害は収穫対象物の根部には及ばないと考えられ、葉への加害による根部収量の低下によって要防除密度を設定する必要がある。しかし、アシグロハモグリバエはダイコンの青首部分に潜入して著しく品質を損ない、ナモグリバエも多発すれば収穫したダイコンの茎部から成虫が羽化するなどの間接的な被害が認められる。

ハモグリバエ類の防除対策

ハモグリバエ類の主要な防除対策として、以下の項目が挙げられる。これらの防除対策はハモグリバエ類の発生を低く抑える環境抵抗を増大させる方法であり、果菜類や葉菜類に対しても共通の防除法となる。

・寄主範囲が広いことから、ほ場内および周辺の雑草を除去し、ほ場衛生に努める。
・モグリバエ類の多くは薬剤抵抗性が発達しているので、ハモグリバエ類を対象とした農薬散布しても被害が目立つ場合は、関係機関に問い合わせる。
・ハモグリバエの被害が見られる苗は定植しない。
・ハウス栽培では入り口や開口部に防虫ネット（目合い 1 mm 以下）を張り、成虫の侵入を防止する。
・被害残渣は発生源となるため、ほ場外へ持ち出し埋設等の処理を行う。
・密度抑制のため夏季のハウス内蒸し込み処理を行う。
・冬季に作付けしないハウスではビニールを撤去するなど越冬できない環境を作る。

害虫の侵入防止を目的とする物理的防除法

防虫ネット: 施設やハウス栽培では、侵入遮断を目的とした防虫ネットが最も有効であり、トマト黄化葉巻病とタバココナジラミのようにウイルス病とその媒介昆虫の防除には不可欠の技術となる。害虫は体長や体幅によって通過できる防虫ネットの目合いが異なり、微小害虫では走光性を利用した実験装置によって防虫ネットの目合いや織り方、空隙率の相

違と害虫の通過率の関係が解析されている。各種の野菜類を加害するマメハモグリバエに対しては 0.6mm 目合いが 1mm 目合いよりも防除効果が高く（中野、2005）。ネギ属を加害するネギハモグリバエでは 0.4mm ネットを通過する個体はみられず、0.8mm ネットの通過率も 12%と低く抑えられた（繁田・岡崎、2007）。また、0.4mm ネットでの最高気温は 50℃以上（1 mm ネットより 6 ℃上昇）となったが、0.8mm 目合いでは 0.5℃程度の上昇であり、0.8mm 目合いが実用的とされた。

露地野菜では、防虫ネットのトンネルや被覆資材のべたがけが有効である。カブの害虫に対して防虫ネットをトンネル被覆した場合0.6mmネットでキスジノミハムシ、コナガ、アオムシに加えてナモグリバエの被害防止効果がみられた（柿崎、2007）。また防虫ネットトンネルでは、ネット内への害虫侵入がある程度生じるため、その対策が必要となる（熊倉ら、2003; 2005）。

近紫外線カットフィルム: 近紫外線（UV）カットフィルムはアザミウマ類、アブラムシ類、コナジラミ類等の侵入を防止するが、アントシアニンの生成阻害（ナス等）や授粉昆虫（ミツバチ等）の行動阻害に注意が必要である。近紫外線領域は昆虫にとって可視領域（昆虫の走行性ピークは 360nm 付近）であり、近紫外線が除去される条件は昆虫にとって暗黒下と同じ状況となる。ナモグリバエは 360nm 以下、370nm 以下、380nm 以下の光を通過しない近紫外線カットフィルムを忌避する行動を示した（太田ら、2008）。また、近紫外線カットフィルムを展張したハウスと一般農業フィルム展張ハウスにおける害虫侵入数を比較することによってハモグリバエ類に対する有効性が明らかにされている。

蒸しこみ、太陽熱等の利用: 蒸しこみ等の太陽熱の利用では、高温に対する害虫の致死反応とその経時変化を明らかにする必要がある。マメハモグリバエ蛹（田中ら、2000）は 50℃以上で防除効果が高まる。土中に生息するハモグリバエ類蛹では、生息する土中深度と蒸しこみ処理等による温度変化の関係を解析する必要がある（甲斐・森田、2001）。

侵入した害虫の捕獲を目的とする物理的防除法

みのる産業（株）と福岡県農業総合試験場が共同で開発した捕虫機（走行タイプと歩行タイプ）が市販されている。これらの捕虫機は、本体に取り付けた「ひも」が作物に触れ、飛び出した害虫を動力噴霧器の送風で回収袋に吹き込んで、捕獲する構造を採用している（井手ら、2004）。この軟弱野菜用送風式害虫捕集防除機は、シュンギク生育中期の 9 日間に集中して 7 回（1 日 1 往復）の処理を行い、合計 12 回の捕集処理によってマメハモグリバエの発生密度を無処理区の約 1/3 に抑えたとしている。また、ハモグリバエ類以外にもコナガ、キスジノミハムシの捕集が可能とされている。

軟弱植物用の飛翔害虫捕獲装置の開発

コマツナ等を加害する害虫を対象に「軟弱植物用の飛翔害虫捕獲装置（特願 2007-319998）」を独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構中央農業総合研究センターと野菜茶業研究所の共同で開発した。飛翔害虫捕獲装置は、アブラナ科野菜で問題となるコナガとナモグリバエを主要なターゲットとした（武田、2009）。

本装置は、うねを跨いで走行するアルミ製台車に盤型換気扇 3 台を設置したもので、風による植物体の揺らぎと昆虫の走行性を利用して飛翔した害虫を捕獲する方式であり、成虫が飛翔したところを盤型換気扇の吸い込み風で回収袋（捕虫網）に捕獲することができる。さらに、吸い込み口を植物体の先端部に配置するため電動昇降シリンダを設け、吸い

込み口には植物体の損傷を防止するための金網（目合い 15mm）を配置している。盤型換気扇の回転方向はスイッチによって変更可能で、中央換気扇のみを下向き送風し、両端の換気扇で害虫の捕獲・吸引を行うことができる。

ナモグリバエの雌成虫に対しては第１回処理で 38.3％を捕獲し、第２回処理で 56.7％を捕獲したが、以後の捕獲数は減少した。捕虫処理は各時期に３往復としたが、１往復目で 70％が捕獲され、２往復目で全体のほぼ 90％が捕獲された。コマツナ収穫期の被害ならびに虫数調査では、ナモグリバエの幼虫と蛹を含むマイン数に対しての防除価は 92.8 と高い防除効果を示した。このようにナモグリバエの次世代虫数には高い防除効果がみられた。

軟弱植物用の飛翔害虫捕獲装置は、コナガやハモグリバエ類、キスジノミハムシに高い防除効果を示す。しかし、残効性がなく捕虫回数が多いことが課題である。また、軽微な被害でも品質が低下する軟弱野菜での実用化にはさらに捕獲効率を高める必要があり、他の侵入防止を中心とする物理的防除法との組み合わせで防除体系を策定する必要がある。特に、コナガの２齢幼虫（１齢幼虫は葉内潜入）が捕獲できるような構造となれば他種の害虫を含めて適用範囲が広がる可能性がある。

ナモグリバエの発生生態

ナモグリバエ:ナモグリバエ *Chromatomyia horticola* (Goureau) はヨーロッパ、アフリカ、アジア全域に広く分布する潜葉性の害虫である。本種は過去に目立った多発傾向を示すことがなくマイナー害虫と考えられていた。しかし、1990 年代から各地で発生が増加する傾向にあり、静岡県において多発生の要因が解析されている（西東、2004）。近年の多発要因として、薬剤に対する感受性の低下や農薬散布による寄生蜂への悪影響によるリサージェンスが推定されているが、その詳細については不明である。現在の発生状況として、北海道のエンドウ、岩手県や長野県のレタス、神奈川県のダイコン、キャベツにおいて多発が報告されている。ナモグリバエは広食性で、寄主植物は 100 種近くに及ぶが、エンドウやアブラナ科野菜の害虫として最も有名である。雌成虫は葉の表面や、裏面を産卵管で傷つけ、滲出する汁をなめる。この食痕は円形の小さな孔として点々と残る。幼虫は葉の組織に潜入する。潜孔は線状で葉肉内を不規則に蛇行し、多数寄生すると葉がほとんど食い尽くされて、白い袋状になり、生育が弱まり減収する。ダイコンでは、葉が食害されることにより、光合成を行う面積が減少するとともに、産卵痕や食痕、潜入孔の被害によって葉つきダイコンの出荷が不可能となる。キャベツやレタス等の葉菜類では、産卵痕や食痕、潜入孔の被害によって品質が低下する。

一般には蛹越冬であるが、暖地では幼虫が発育を続け施設内で世代を繰り返す。野外では北日本で年３～４世代、暖地では春季だけで４～５世代を繰り返すようであり、３～４週間で１世代を経過する。盛夏には発生がみられなくなるが、秋に再び発生する。葉に産み付けられた卵から孵化した幼虫は海綿状・柵状組織を不規則に加害し、潜孔の中で蛹化する。ナモグリバエは、関東地域では夏季の高温により世代が途切れるが、春季に４世代～６世代を経過し、秋季にも２世代程度を経過する。北海道の無加温ハウスでエンドウを連続栽培した場合に年７世代～８世代を経過する（水越・戸川、2001）。北海道では、露地においても夏季にナモグリバエの発生が確認されている。また、岩手県ではナモグリバエの発生と温度の関係が解析され、平均気温が 15～20℃で発生量が増加し、20℃を超えると激減する（千葉、1983）。ナモグリバエの露地作物での発生は夏季にはほとんどみられない

とされていたが、香川県における調査では 6 月から 9 月にかけてもわずかながら発生が確認されている（生咲、2004）。本種は、暖地では成虫や蛹の非休眠状態で越冬するが、北海道では蛹越冬とされていた（遠藤、1953）が、0℃での蛹の生存期間が北海道の積雪期間である 60 日よりも短く、春季の黄色水盤トラップでの捕獲が北海道の各地で南風が卓越した時期と一致することから長距離移動の可能性が指摘されている（岩崎ら、2008）。

ナモグリバエの発育と温度の関係については、京都個体群を用いた吉田・笹川（1975）の報告や北海道の個体群を用いた水越・戸川（1999）の報告がある。北海道の個体群では、20℃の卵期間は 5.1 日、幼虫期間が 5.0 日、蛹期間が 8.8 日とされており、卵から成虫羽化までの発育零点は 6.0℃で、有効積算温度は 270.2 日度とされている。また、25℃では成虫の羽化率が低下し、高温による発育障害が認められたとしている。

ナモグリバエの薬剤感受性:1990 年代以降に生じたナモグリバエの多発生の要因のひとつに薬剤に対する感受性の低下が指摘されている（西東、2004）。ダイコンのナモグリバエに登録のあるマラソン乳剤は静岡個体群と鹿児島個体群のいずれにも効果はみられず（Saito, 2004）。このように、ダイコンのナモグリバエに登録のあるマラソン乳剤の防除効果は低いが、ナモグリバエに卓効を示すトルフェンピラド乳剤が登録された。1980 年代以降に行われたナモグリバエの薬剤感受性に関しては、千葉（1983）、戸川・水越（1998、1999）、徳丸・山下（2004）、Saito（2004）の報告がある。徳丸・山下（2004）は、有機リン剤、カーバメート剤、合成ピレスロイド剤、IGR 剤、ネオニコチノイド剤およびその他の合成殺虫剤の中から合計 21 種類の殺虫剤による２齢幼虫期と成虫期の死亡率と次世代成虫の羽化を調査している。幼虫期の死亡率が高い殺虫剤は、イソキサチオン乳剤、クロルピリホス水和剤、カルタップ水溶剤、チオシクラム水和剤、エトフェンプロックス乳剤、シペルメトリン乳剤、エマメクチン安息香酸塩乳剤、スピノサド水和剤、トルフェンピラド乳剤、ミルベメクチン乳剤としている。成虫の死虫率が 90%以上となった殺虫剤は、イソキサチオン乳剤、クロルピリホス水和剤、チオシクラム水和剤、エトフェンプロックス乳剤、エマメクチン安息香酸塩乳剤およびピリダリル水和剤としている。また、幼虫に対して 80%以上の死虫率を示したシロマジン液剤とミルベメクチン乳剤の成虫に対する効果は低かった。Saito（2004）は、エンドウに登録のある農薬の多くは効果が低く、カルタップ水溶剤だけが効果を示したとしている。また、マラソン乳剤はもともとナモグリバエに対する殺虫効果が低かった可能性を指摘し、PAP 乳剤については 1990 年代以降に抵抗性の発達が生じた可能性を指摘している。カルタップ水溶剤の殺虫効果は 90%以上と高いものの LC_{50} 値が実用濃度に近いことから、ほ場での防除効果が低下する可能性を指摘している。また、Saito(2004)は、農薬散布後の期間が異なるほ場から採集したナモグリバエの天敵寄生蜂の寄生率が農薬散布に近いほど低下することを示し、農薬散布によるナモグリバエのリサージェンスの可能性を指摘している。

天敵寄生蜂に対する農薬の影響:ナモグリバエの増加要因として、ナモグリバエ自体の農薬に対する抵抗性の発達と天敵寄生蜂に対する農薬の影響によるリサージェンスが推定されている（西東、2004）。これらの要因を明らかにし、天敵を保護した栽培体系を確立するためには、現在の防除体系において天敵寄生蜂に対する悪影響の大きな農薬を明らかにし、選択性農薬の利用を進めることが必要となる。

ナモグリバエの防除対策と今後の展望:物理的な侵入防止としてネット被覆によるナモグリ

バエの防除効果が報告されている。ネットには 4mm あるいは 6mm の目合いが用いられ、いずれの処理も無処理区よりも有意に摂食痕数の低下がみられた。エンドウのハウス栽培では、紫外線除去フィルムによってナモグリバエの加害が減少することが報告されている（井口、1995）。また、シュンギクのシルバーマルチによってナモグリバエの被害軽減がみられたという報告がある（菊池、1997）。これらの防除対策は、露地のダイコンやキャベツのナモグリバエ防除への利用は困難な場面が多いと推定される。同様に、開放系である露地では天敵寄生蜂の放飼効果も期待しにくいものと推定される。

ナモグリバエの選好性が高いエンドウをおとり植物として利用する方法も考えられるが、エンドウに誘引した場合にも成虫発生前にエンドウを処理する方法が難しいと考えられる。実際に、レタスではナモグリバエの発生源となるマメ科植物やアブラナ科植物の作付けを制限し、発生源をなくすことが推奨されている。現状では、ナモグリバエがリサージェンスを起こす害虫であることを考慮し、農薬使用において選択性の高い農薬を使用し、土着の天敵寄生蜂の活動を高める栽培体系の構築を中心に研究を進めることがもっとも重要である。

参考文献

1) 遠藤和衛 (1953) 蔬菜の害虫（終講）エンドウハモグリバエ.北農. 20: 397-403.
2) 井手　治・森山友幸・妹尾盛次・岡武康之・姫野修一 (2004) 軟弱野菜用送風式害虫捕集防除機の開発.福岡農総試研. 23: 54-58.
3) 岩崎暁生・岩泉　連・高野俊一郎(2004)　日本におけるアシグロハモグリバエ *Liriomyza huidobrensis* (Blanchard)の新発生.植物防疫. 58: 13-19.
4) 岩崎暁生・春日井健二・岩泉　連・笹川満広 (2000)　日本におけるトマトハモグリバエ *Liriomyza sativae* Blanchard の新発生.植物防疫. 54: 142-147.
5) 岩崎 暁生, 三宅 規文, 武澤 友二, 水越 亨, 岩泉 連, 上堀 孝之 (2008) 北海道における春季のナモグリバエの長距離飛来. 応動昆. 52: 129-137.
6) 井口雅裕 (1995）エンドウのハウス栽培における紫外線除去フィルム利用によるナモグリバエの防除.今月の農業. 39 (1): 47-49.
7) 菊池　修 (1997）ネギアザミウマ、アブラムシ類、ナモグリバエに対するシルバーマルチとシルバーテープの忌避効果.東北農業研究成果情報. 95-96.
8) 生咲　巌 (2004）香川県の露地作物におけるハモグリバエ類の発生状況.今月の農業. 48 (6): 86-89.
9) 甲斐伸一郎・森田鈴美 (2001) 小ネギハウスにおけるネギハモグリバエの陽熱処理による防除効果.九病虫研会報. 47: 108-111.
10) 柿崎正志 (2007) カブの害虫に対する防虫ネットのトンネル被覆による被害防止効果. 北日本病虫研報. 58: 121-125.
11) 熊倉裕史・長坂幸吉・中川　泉・藤原隆広・田中和夫 (2003) 露地栽培のコマツナおよびハクサイに対する防虫ネットトンネルと太陽熱処理の併用効果.近中四農研報. 2: 27-39.
12) 熊倉裕史・長坂幸吉・藤原隆広・吉田祐子 (2005) 初冬どりハクサイでの防虫ネットトンネルと太陽熱処理の併用による虫害抑制.近中四農研報. 4: 1-14.

13）水越　亨・戸川　浩 (1999）北海道渡島地方におけるナモグリバエの発育零点、有効積算温度、および年間世代数.北日本病害虫研報. 50: 169-172.
14）水越　亨・戸川　浩 (2001) 北海道におけるナモグリバエの生態と防除法.植物防疫. 55: 293-297.
15) 中野昭雄 (2005) 物理的防除資材の利用によるチンゲンサイのマメハモグリバエ防除. 徳島農研報. 2: 13-21.
16) 太田 泉・武田光能・本多健一郎 (2009) 透過波長域が異なる近紫外線除去フィルム下で軟弱野菜の害虫類が示す行動反応.関西病虫研報. 52: 5-9.
17) Saito, T.（2004）Insecticide susceptibility of THE leafminer, *Chromatomyia horticola* (Goureau) (Diptera: Agromyzidae). Appl. Entomol. Zool. 39 (2): 203-208.
18）西東　力（2004）ナモグリバエの多発生の原因.植物防疫.58 (7): 295-299.
19) 繁田ゆかり・岡崎真一郎 (2007) 小ネギのネギハモグリバエに対する各種防虫ネットの被害軽減効果. 九病虫研会報. 53: 77-81.
20）千葉武勝（1983）春播きサヤエンドウにおけるナモグリバエ *Phytomyza horticola* Goureau の発生消長と防除法について.北日本病虫研報.34: 50-52.
21) 武田光能 (2009) 野菜害虫の物理的防除技術の現状と今後の展望. 農業機械学会誌. 71 (4) :4-9.
22) 田中　寛・吉川和伸・杉本毅・高浦裕司・柴尾学 (2000) マメハモグリバエ蛹の致死温度および太陽熱による防除法の有効時期. 応動昆. 44: 225-228.
23）戸川　浩・水越　亨（1998）サヤエンドウに寄生するナモグリバエの茎葉散布殺虫剤 6 剤に対する薬剤感受性 北日本病害虫研究会報. 50: 173-175.
24）戸川　浩・水越　亨（1999）サヤエンドウのナモグリバエに対する茎葉散布殺虫剤 7 剤の効果.北日本病害虫研究会報. 50: 173-175.
25）徳丸　晋・阿部芳久（2003）トマトハモグリバエ，マメハモグリバエおよびナスハモグリバエの発育に及ぼす温度・日長の影響ならびに増殖能力. 応動昆 47: 143-152.
26）徳丸 晋・栗田 秀樹・福井 正男・阿部 芳久(2005) トマトハモグリバエ，マメハモグリバエおよびナスハモグリバエ（双翅目:ハモグリバエ科）の殺虫剤感受性. 応動昆 49: 1-10 .
27）Tokumaru, S. and Y. Abe (2005) Interspecific hybridization between *Liriomyza sativae* Blanchard and *L. trifolii* (Burgess) (Diptera: Agromyzidae) Applied Entomology and Zoology. 40: 551-555.
28) 徳丸　晋・山下幸司（2004）ナモグリバエの薬剤感受性. 関西病虫研報 46: 91-94.
29）吉田　璋・笹川満広(1975)ナモグリバエの生態学的研究　第３報　成虫の摂食・産卵習性につい.京都府大学. 農学. 27: 37-45.

有機物を利用した野菜の養液栽培と病害防除

野菜茶業研究所
野菜 IPM 研究チーム
篠原　信

はじめに・・・有機質肥料活用型養液栽培について

有機質肥料活用型養液栽培は、有機質肥料のみで養液栽培を行うことができる世界で初めての実用的な技術です。

この栽培が実現した最大の理由は、水中での硝化を成功させた点にあります。

作物にとって最も重要な肥料成分は窒素です。しかし窒素であればなんでもよいというわけではありません。硝酸態と呼ばれる形態の窒素でないと、作物はうまく育つことができません（特に野菜作物は多くが好硝酸性植物に分類され、硝酸態窒素以外だとうまく育ちません)。それ以外の窒素成分、たとえば有機態窒素ばかりでは根が傷害を受けますし、アンモニア態窒素だけではアンモニア過剰障害が発生します。窒素ガスになるともはや通常の植物は利用することができません。野菜をうまく育てるには、効率よく硝酸態窒素を供給してやる必要があります。

本栽培技術では、水中の微生物が有機質肥料を分解して効率よく硝酸態窒素を生成します。そのような水中微生物を培養するには、栽培前の工程として「耕水工程」（水づくり）を行う必要があります。それには、次の三つの手順を踏みます。

１．微生物源として、土壌を少量加える（5g/L 程度)。
　＃培養液が 100L を超える場合は 1g/L 程度。
２．有機質肥料を毎日、少量ずつ加える（0.1～1g/L/day 程度)。
　＃硝酸態窒素が検出されたら添加を中断。
３．2 週間以上曝気する。
　＃アンモニウムイオン、亜硝酸イオンが検出されなくなるまで曝気する。

この三つの注意点を守ると、必要な微生物を水中で培養することができます。その培養液を栽培に用いると、有機質肥料で養液栽培することができるようになります。

本栽培の大きなメリットは、根部病害の抑止効果です。フザリウム病や青枯病の病原菌を接種しても、根部病害の発生を抑えることができます。これに対して従来の養液栽培では、根部病害がしばしば発生し、大きな被害をもたらしてきました。根部病害の抑制効果は、養液栽培にとって大きなメリットです。

このほか、本栽培技術は培養液を循環利用するため、廃棄による環境負荷がなく、環境に優しい栽培技術となっています。

本研修では、初級コース、中級コース、上級コースに分類して、有機質肥料活用型養液栽培の栽培技術を紹介します。

初級コース・・・小規模、単純な方法

初級者コースでは、できるだけ簡単な方法で栽培を成功させることを目的にしています。コマツナ、サラダナ、ミズナなどの軟弱野菜を育てるには、この方法で充分です。まずは軟弱野菜でこの栽培の成功体験を積んで下さい。トマトの場合は施肥量を増やすとともに、カリウムを補強します。

＜注意！＞初めてこの栽培を試す人はかならず初級コースから始めて、成功体験を積んで下さい。成功体験なしにいきなりスケールアップした栽培をしたり、違う方法を試したりすると、失敗しても何が原因なのか分からなくなります。2009 年現在は、本栽培技術に最適化した商品はまだ開発されていませんので、とりあえず使用可能であることが確認済みの資材で説明します。他のメーカーの資材で代替可能かどうかは、自身で初級コースの方法を一部だけ変更（たとえば、土壌を他のメーカーのものに変更して、他の資材はそのまま）し、検討して下さい。

＜材料＞

プランター（15 リットル程度、50×25×20 センチ程度）

発泡スチロールの板（2 センチ厚、プランターにすっぽり収まるように成形。苗を植える穴（直径 2 センチ程度）を開けておく）

ウレタンマット（苗穴に植えるときに苗を包むもの）

土壌（微生物が豊富で、硝化菌が生息するもの、例：「苗一番」や「ゴールデンバーク」）

ソリュブル（窒素 6%含有のもの、例：枕崎産の鰹ソリブル、焼津産のソリュブル）

粒状有機石灰（ホタテ石灰、カキガラ石灰などの有機石灰を廃糖蜜で粒状化したもの、NPK 以外の微量要素を補う目的で使用）

生ゴミ袋（和紙タイプの目の細かいもの）

タコ糸

エアーポンプ（金魚のブクブク。チューブとエアーストーンがセットのもの）

天然有機カリ

資材例と入手先

苗一番：青山種苗株式会社（〒483-8341 愛知県江南市前飛保町栄 220、TEL:0587-53-2198 FAX:0587-54-3380 、e-mail: feuillage_a2z@ybb.ne.jp）

ゴールデンバーク：清水港木材産業協同組合　グリーンチーム（〒424-0057　静岡県静岡市清水区堀込 345、ＴＥＬ：０５４３－４５－４５１３、ＦＡＸ：０５４３－４５－８００２、http://www.mokusan.or.jp/team_h.htm、E-mai：green@po3.across.or.jp）

枕崎産ソリュブル（鰹ソリブル）：枕崎水産加工業協同組合（鹿児島県枕崎市松之尾町 71 番地、TEL 0993-72-0229、FAX 0993-72-7994）注文の最低単位は一斗缶(20kg)

焼津産ソリュブル（魚煮汁）：協同組合　焼津水産加工センター（〒425-0065　静岡県焼津市惣右ェ門 1280 番地の 2、TEL:054(624)2111(代)、FAX:054(623)3834、e-mail: info@yaizufpc.or.jp）注文の最低単位は一斗缶(20kg)

粒状セルカ（カキガラ石灰）：JA で販売。「セルカ」は別物なので注意。

ネオライム（ホタテ石灰）：研農（愛媛県西予市野村町野村５－１１１、電話番号：0894-72-1500、FAX：0894-72-3119）20kg 単位で販売。

天然有機カリ（パームヤシ灰）：マドラウイング株式会社（【本社】茨城県水戸市鯉淵町 4212-60 、 TEL:029-259-7491 、 FAX:029-259-7492 、 info@madurawing.net、【北海道営業所】北海道河西郡芽室町坂の上 9 線 8 号 、 TEL: 0155-65-2160 FAX: 0155-61-5895 ） http://www.madurawing.net/index.html

ウレタンマット：M 式水耕研究所（〒490-1414 愛知県弥富市坂中地 1-37、TEL:0567-52-2401 、 FAX:0567-52-0597 、 http://www.gfm.co.jp/Netshop/6.html）

＜方法＞

有機質肥料活用型養液栽培は、栽培前の工程（耕水工程）と栽培の工程の二段階に分かれます。

栽培前工程

１．プランターに水を張り（約 15 リットル）、生ゴミ袋に土壌 50ｇを入れてタコ糸で口を縛り、紅茶のティーバッグのようにして水に浸す。

２．エアーポンプで水を曝気する。

３．ソリュブル 10g（大さじ 1 杯弱）を水の中に溶かす。

４．発泡スチロールのフタをして、黒ビニールなどで光が入らないように被覆し放置する。

５．硝酸イオンが検出されたら土袋を培養液から除去する。

６．硝酸イオンの濃度がピークアウトして 150～170mg/L 程度で安定し、アンモニウムイオンが 10mg/L 以下になれば、この工程は終了。遮光すれば培養液を長期間保存できる（1 年以上）。

（注 1）数日間は臭います。その後、ニオイが消えます。

（注 2）使用する土壌は、肥沃な畑土壌であればどれでも使えますが、しばらく栽培していない土壌や化学肥料が主体で栽培していた畑土壌は微生物の活動が弱く、上述の量のソリュブルを添加すると硝化菌が死滅してしまい、硝化に失敗する恐れがあります。微生物の活動が弱い土壌の場合は、ソリュブルの添加量を 10 分の 1（上記のサイズのプランターの場合、1g）に減らして下さい。培養液が河川水や井水のような自然水の場合、土壌を添加しなくても耕水工程を行うことができますが、この場合も、ソリュブルの添加を 0.1g/L 以下としてください。ソリュブルの添加量を増やすには、肥沃な土壌を微生物源に使用して下さい。

（注 3）水中のアンモニア、亜硝酸イオン、硝酸イオンを毎日測定します。リフレクトクァント（メルク社）という試験紙が安価で正確に測定することができます。

（注 4）水温は 20～37℃の範囲が望ましく、温度が高いほど硝化が早く進みます。耕水工程は水温 25℃で 2～3 週間かかります。

（注 5）ソリュブルは最初だけの添加より、毎日少しずつ添加した方が濃い培養液を作成することができます。7.5 g（培養液 1L あたり 0.5g に相当）を 5 日間、毎日添加すると、合計 37.5g の添加となり、初期添加のみより約 4 倍程度高い濃度の培養液（600 mg/L 程度の硝酸イオン）にすることができます。ただし、硝酸イオンが検出されはじめたら（5mg/L 程度）、添加を停止して下さい。

（注 6）アンモニウムイオンが 10 mg/L 以上残存した状態で栽培を始めると、作物が傷

害を受けることがあります。

（注 7）硝化がなかなか進まず、アンモニウムイオン、亜硝酸イオンの濃度が高い状態が続くことがあります。この場合、培養液を水で 2 倍に希釈すると 3 日ほどで一気に硝化を進めることができます（希釈の結果、培養液の硝酸イオン濃度は半分になります）。

（注 8）土袋の除去は栽培開始前に必ず行って下さい。土袋を浸漬したままだと脱窒の原因となり、硝酸イオンが失われたり作物の生育が悪化したりします。

栽培・・・定植

１．耕水工程開始から 2～3 週間すると、栽培が可能になる。培養液中のアンモニア濃度が 10mg/L 以下となり、硝酸濃度が 100-400mg/L 程度あれば栽培に適当。

２．有機石灰（粒状セルカ 135g、ネオライム 15g）を培養液に添加し、よく混合する。

３．発泡スチロールの板に苗を植える。コマツナ（あるいはサラダナなど）の苗を脱脂綿で優しく包み、植え穴に差し込む。発泡スチロール板をプランターに置いたとき、根が水に浸るように。この場合、1 プランターに 12 株定植。

栽培・・・施肥管理

１．苗を定植して 4 日後に 0.4g のソリュブルを培養液に添加する（1 株あたり 2mgN）。以後は毎日、同量のソリュブルを添加する。

２．苗の葉の長さが 3～4 センチに伸びたらソリュブル 0.8g（1 株あたり 4mgN）を毎日添加する。

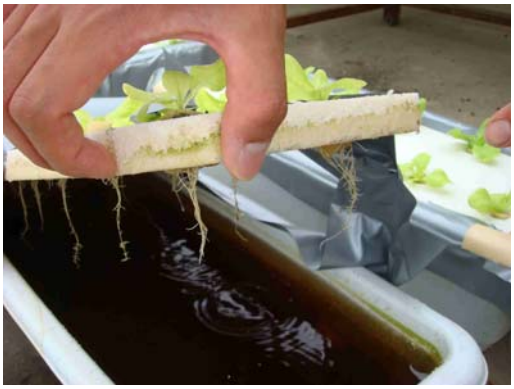
４．水が減ってきたら、随時補給する。

５．定植して 1 ヶ月ほどしたら収穫。

（注 1）栽培期間中、鉄欠乏の症状（新しい葉の色が黄色い）が出たら、培養液を底からかき混ぜ、有機石灰を攪拌してください。葉色が葉脈から回復します。

（注 2）肥料の種類を途中で変更すると、微生物生態系が壊れ、作物の生育が急速に悪化します。耕水工程で使用した有機質肥料と同じものを使用して下さい。

収穫後、そのまま栽培を継続したい場合



１．プランター壁面の微生物をブラシなどで擦り、培養液とよく混合して、その混合液の 5 分の 1 程度（3 リットル）を別の容器に取っておき、残りは全部廃棄する。

２．分けておいた 3 リットルをプランターに戻し、水を足して満たす（計 15 リットル）。

３．新たに有機石灰（粒状セルカ 135g とネオライム 15g）を添加して培養液とよく混合する。

４．苗を定植して、以後、既述のようにソリュブルを添加する。

コマツナ以外の作物を栽培したいとき

１．葉菜（サラダナ、チンゲンサイ、ミズナなど）の場合

コマツナの時と操作は同じです。

２．トマトの場合

変更点が二つあります。ソリュブルの添加量を増やすこと（１株あたり 30～60mgN/日）とカリウムを補強してやることです。

・1 つのプランターに本葉の出た苗（播種後約 2 週間）を 1 株だけ植える。

・苗が小さい間は 0.5g のソリュブル（30mgN）を培養液に毎日添加する。

・第一果房の果実が直径 3 センチ程度になったら、ソリュブルを毎日 0.75g 添加する。

・第二果房の果実が直径 3 センチ程度になったら、ソリュブルを毎日 1g 添加する。

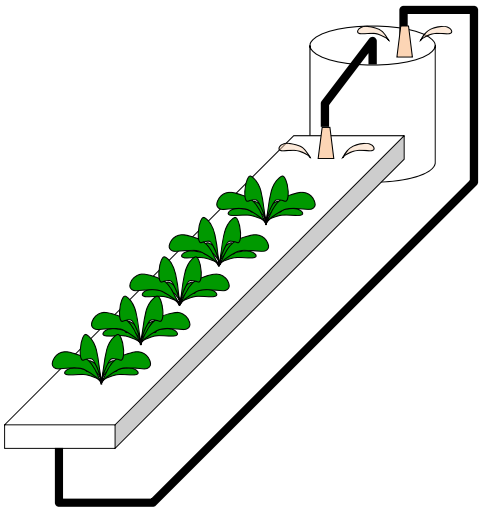
・ソリュブル添加と同時に、天然有機カリを添加する。ソリュブル 1g あたり 57mg の天然有機カリの比率。あらかじめ天然有機カリの懸濁液（57g/L）を作成し、その上清を 1ml ずつ添加すると操作が楽に行える。

中級コース・・・実用的栽培規模、施肥バランスの改良

中級コースでは、実用的な栽培規模で栽培を試みます。初級コースと比べ、施肥バランスを整えるなど、変更点がいくつかあります。

耕水工程・・・米ぬかを耕水工程の段階から添加します。リンを補い、栽培期間中の施肥バランスを改善するためです。ただし、耕水工程では「米ぬかを分解する微生物を培養する」ことが主目的で、NPK のバランスは考慮しません。ソリュブルの 1%重量程度の米ぬかをソリュブルと同時に添加し、ソリュブルと米ぬかを分解する微生物を培養します。

栽培装置・・・栽培装置は、NFT（薄層水耕）が適しています。有機質肥料活用型養液栽培では溶存酸素の要求量が大きく（根が要求する以外に、微生物の呼吸分も必要なため）、DFT（湛液水耕）だと酸素不足になるからです。



配管・・・栽培装置の配管は、13mm の塩ビ管より細い流路がないように注意します。バイオフィルム（微生物群集構造）が形成されるため、細い流路があると目詰まりする恐れがあります。

施肥バランスを整える･･･耕水工程が終了したら、ソリュブルでは不足しがちなリン、カリウムを補強します。NPK（窒素、リン酸、カリウム）のバランスは園試処方と呼ばれる養液栽培の施肥基準に準拠します（おおよそ、$N:P_2O_5:K_2O$ =5:2:8 のバランスになるように）。窒素肥料はソリュブルを主体として、リンの補強に米ぬか（$N:P_2O_5:K_2O$=2.5:6.4:2.2）を、カリウムの補強には天然有機カリ（35% K_2O）を用います。ソリュブルを 1g 添加する際、

米ぬかを 0.4g、天然有機カリ懸濁液（100g/L）の上清を 3ml の比率で添加すると、NPK のバランスが整います。栽培初期は米ぬかの分解が進みにくいため、半腐敗液として添加すると効果的です。培養液の一部をバケツなどに採取して米ぬかと混合し、2,3 日放置した半腐敗液を培養液に戻します。この操作を約 2 週間続けると、培養液に米ぬかを直接添加しても問題なく速やかに分解されるようになります。

有機石灰の添加方法・・・初級コースのように有機石灰を培養液に直接添加すると沈殿が配管の目詰まりの原因になるので、添加方法を工夫します。有機石灰の懸濁液を作成し、その上清を添加します。

有機石灰の懸濁液は有機石灰の 2 倍容の水に懸濁し、一晩静置したものを使用します。上清の全量を毎日、培養液に添加します。残りの有機石灰の沈殿には新しく水を添加して 2 倍容とし、よく懸濁して一日静置し、翌日、上清全量を培養液に添加する、という操作を繰り返します。

葉菜とトマトでは、有機石灰の添加量が違います。葉菜では、栽培装置の培養液 1L あたり 10g の有機石灰（粒状セルカ 9g、ネオライム 1g）を計り取り（栽培装置の培養液総量が 200 リットルの場合、2kg)、2 倍容の水に懸濁します。トマトの場合、苗 1 株あたり 100g の有機石灰を計り取り、2 倍容の水に懸濁します。

有機石灰の更新は、沈殿に貝殻の破片が目立つようになり、懸濁液上清の褐色が薄くなったときに行います。あるいは成長点の葉色が薄くなってきた場合などにも更新して下さい。

なお、有機石灰は NPK 以外の微量要素（Ca,Mg,Zn,Mn,B,MoFe）を補う目的で添加するもので、NPK の供給を目的とする有機質肥料（ソリュブルや米ぬか）とは区別した施肥基準となります。

施肥管理・・・量的管理（作物が 1 日に吸い切る量の肥料を毎日添加する方法）を行います。従来の養液栽培で主流の濃度管理（培養液中のイオン濃度を一定に保つ方法）は不適切なので、注意して下さい（理由は、培養液の肥料成分（硝酸態窒素やリン酸イオン）は栽培開始から約 2 週間で検出されなくなるためです。以後、肥料をどれだけ大量に添加しても硝酸イオンなどは検出されなくなります)。

ソリュブルの施肥量は初級コースと同様に行います。葉菜の場合、葉長が 3cm 以下の時は 30 株あたり 1g のソリュブル、葉長が 3cm 以上になれば倍の 30 株あたり 2g のソリュブルを毎日与えます。トマトの場合、栽培初期は 1 株あたり 0.5g のソリュブル、第一果房の果実が 3cm 大になったら 0.75g、第二果房の果実が 3cm 大になったら 1g を毎日与えます。米ぬか、天然有機カリは、ソリュブルの添加量に比例して添加します。

施肥量の管理は培養液の濁度で行います。肥料添加直前の培養液の濁度（600nm）を分光光度計で測定し、0.05 以下であれば問題ありません。0.05 を超えるときは施肥量が過剰ですので、翌日の施肥量を減らして下さい。

（注 1）耕水工程では有機石灰や天然有機カリを加えないようにして下さい。アルカリ性が強くなり、硝化がうまく進まなくなる恐れがあります。有機石灰や天然有機カリの添加は栽培を開始してから行います。

（注 2）培養液の濁度は肥料添加後、大きく変動します。添加後 1～3 時間で濁度はピークを迎え、その後、徐々に濁度が低下し、培養液は透明に戻ります。施肥量が

植物の要求する以上であった場合、肥料添加直前の濁度は前日よりも高くなります。施肥量が植物の吸収できる量以下であれば、肥料添加直前の濁度は 0.05 以下のほぼ一定の値を示します。

（注 3）培養液の濁度が 0.1 を超える異常値を示す場合は、次のいずれかの問題が生じている可能性があります。

１．施肥量が多すぎる（気温が低くて作物の肥料の要求量が低下しているなど）

２．曝気量が低下している（水流ポンプの停止や、栽培装置のどこかに淀みが生じて局部的に酸素不足になるなど）

問題を解決し、濁度が 0.1 以下に低下するのを確かめて下さい。

（注 4）培養液タンクは小さくて構いません（100 リットル程度)。施肥管理が量的管理に基づくからです（培養液タンクが大きくなるのは濃度管理の場合ですが、有機質肥料活用型養液栽培では濃度管理は不適切)。栽培装置から培養液タンクに培養液が戻るとき、滝のように落水させて曝気が充分行われるようにして下さい。

（注 5）培養液は必ず循環させて下さい。かけ流し式だと微生物が失われてしまい、有機質肥料が分解できなくなります。

（注 6）水流ポンプを間欠運転（1 時間に 10 分程度しか流水しないなど）にする場合は、培養液タンクにエアーポンプを設置し、培養液を曝気して下さい。

（注 7）栽培を長期間連続して行う場合、培養液は 1 ヶ月に一回半分量を廃棄し、新しい水を添加して希釈して下さい。ソリュブルにわずかに含まれる塩分（ナトリウムと塩素）を除去するためです。廃棄する培養液には肥料成分（硝酸イオンやリン酸イオン）はほとんど含まれないので、環境に負荷を与える心配はありません。

（注 8）ソリュブルのかわりにコーンスティープリカー(CSL)を用いることができます。CSL は窒素含量がソリュブルの半分（3%）のため、ソリュブルの倍の量を添加します。ただしリンの含量が高い（$N:P_2O_5:K_2O$ =3:3:2）ので、米ぬかを添加する必要はありません。天然有機カリの添加量は、ソリュブルの場合の 3 分の 2 程度に減らします。

上級コース・・・固形肥料での栽培

上級コースでは、菜種油粕などの固形肥料を使った栽培を行います。固形肥料はソリュブルや CSL のような液肥とは違い、難易度が高いので、初級、中級で十分に経験を積んでから試して下さい。

固形肥料の使用が難しい理由は、「脱窒」が発生しやすいためです。脱窒とは、硝酸態窒素が脱窒菌という微生物の作用で窒素ガスに変換される反応のことを指します。脱窒は、2 つの条件がそろうと発生しやすくなります。高濃度の硝酸態窒素と、微生物の栄養源になる有機物の存在です。固形肥料の場合、この 2 つの条件がそろいやすくなり、脱窒を招く可能性が高くなります。分解が進んで硝酸態窒素が水中に現れるようになっても未分解の有機成分が残存し、それを脱窒菌がエネルギー源にして脱窒を始めてしまうためです。ソリュブルのような液肥は分解が早いため、硝酸態窒素が発生する頃には脱窒菌の栄養源となるような有機成分は失われています（ソリュブルの添加を、硝酸態窒素の発生前に停止

するのはそのためです)。しかし、固形肥料だと分解の遅い有機成分がたくさん含まれるので、脱窒菌が活動する条件がそろいやすくなるのです。固形肥料での有機質肥料活用型養液栽培が難しいのは、このためです。

そこで固形肥料を用いる際は、耕水工程をソリュブルとブレンドして行うことで、脱窒を回避します。ソリュブルと固形肥料とのブレンド比を 19:1 程度にし、ソリュブルを主体にして耕水工程を行うことで、脱窒を回避しつつ、固形肥料を分解する微生物を培養します。

栽培を開始してから 3 日後、固形肥料とソリュブルとのブレンド比を少しずつ変えていき、やがて固形肥料だけを添加して栽培します(最初の 5 日間はソリュブル:固形肥料＝9:1、次の 5 日間は 8:2、次の 5 日間は 5:5)。固形肥料は直接培養液に添加するのではなく、一部バケツなどに採取した培養液に 2 日間浸漬した半腐敗液として添加します。2 週間ほど続けると、分解が早くなります(培養液内の微生物が活発になり、バケツの中での分解も早まる)。その状態になったら、固形肥料を粉末のまま培養液に直接添加しても大丈夫です。

(注 1) 脱窒すると硝酸態窒素の濃度が急激に低下します(2～3 日でほぼ硝酸イオンが消滅)。いったん脱窒が起きてしまった培養液では、もはや栽培ができなくなります。

培養液タンク、あるいは栽培装置内で脱窒が発生した場合は、培養液を全て廃棄し、培養液タンク、栽培装置をよく乾かして下さい。脱窒菌の活動を抑えるには、乾燥が効果的です(メカニズムは不明です)。

培養液は耕水工程からやり直したものをお使い下さい。

(注 2) ソリュブルとブレンドせず、固形肥料だけで耕水工程を行う方法があります。硝酸態窒素がわずかでも検出されたら、固液分離(ろ過)を行う方法です。

ソリュブルのかわりに固形肥料だけを添加し、硝酸態窒素が 5mg/L 検出されたら和紙状の目の細かい生ゴミ袋で培養液をろ過しながら、別容器に移します(土袋は新しい容器には移さないようにして下さい)。これにより、未分解の有機物を除去し、脱窒を回避しながら硝化を進めることができます。

(注 3) 固形肥料はなるべく窒素含量の高いものを使用します。C/N 比で 9 以上の窒素含量の低いものは脱窒が発生しやすく、使用が困難になります。C/N 比が 11 以上の有機質肥料は、それ以下の有機質肥料とブレンドしない限り使用できません。

(注 4) 植物残渣を肥料として栽培することが可能です。ただし、使用できるのは窒素含量の高いトマト腋芽などに限定されます。窒素がやや不足することがあるので、ソリュブルとブレンドすることが望ましいです。

トマト腋芽で栽培する場合は、有機石灰の添加を減らします。トマト腋芽は微量要素が多く含まれるためです。有機石灰を従来通りの量で添加すると、微量要素の過剰害が発生します(トマト果実が苦くなるなど)。

発展コース・・・アクアポニックス(水耕栽培と養魚の組み合わせ)

本栽培技術を応用すると、培養液中で魚を飼いながら野菜を栽培するアクアポニックスが可能です。この場合、肥料は魚の飼料だけとなります。

耕水工程は初級コースと同様で、添加する有機質肥料をソリュブルのかわりに熱帯魚用の飼料を添加して行います。添加量は水 10 リットルあたり 0.1g 程度のごく少量にとどめます。水温 25℃の場合、約 2 週間で野菜の定植を行えます。

飼養する魚は肉食のもの、あるいは植物の根を傷めない種類を選びます。ウナギ、ドジョウ、ネオンテトラなどが適しています。コイ・フナ・金魚は植物の根を食べますので、これらを飼う場合は根と空間を隔てる必要があります。

ドジョウを飼うと壁面の微生物を摂食するので、透明な培養槽に入れて窓際の明るい場所に設置しても藻が発生しにくくなります。野菜が培養液内の様々な成分を吸収するので、水質悪化を抑えながら魚の養殖が可能になります。

タニシやシジミなどの貝類を入れると野菜に鉄分欠乏が生じるため、貝類は入れないようにして下さい。

今後、魚種や野菜作物の選定などを工夫すれば、水質汚染を回避しながら淡水魚の養殖が可能になると考えられます。大規模に試験する場合は、まだまだ条件検討が必要です。

本栽培技術の参考資料

初心者向けのプランター栽培の方法は、動画でも紹介しています。「初心者」「有機養液栽培」の二つのキーワードでネット検索してみて下さい。

この栽培技術の詳しい説明は、「農業および園芸」2006 年 7 月号に掲載されています。

短いですが、最も分かりやすい文章は「化学と生物」2008 年 4 月号に掲載されています。

根部病害抑制効果についての詳しい説明は、「植物防疫」2007 年 1 月号に掲載されています。

篠原信（2006）有機肥料の養液栽培、農業および園芸、81(7), 753-764

篠原信（2007）養液栽培における有機物を活用した根部病害抑止技術、植物防疫、61(1), 17-20

篠原信（2008）有機肥料で養液栽培・・・可視化する「根」、化学と生物、46(4),230-232

篠原信（2009）根面の活性化、「微生物と植物の相互作用」ソフトサイエンス社、288-294

トマト葉かび病の現状と防除対策

野菜茶業研究所
野菜 IPM 研究チーム
飯田祐一郎

１．はじめに

トマト葉かび病（*Passalora fulva*）は、ハウス栽培などの多湿な環境で葉に斑点性の病徴を示し、生育不良・着果不良などを引き起こす不完全菌類に属する糸状菌（カビ）である。近年、トマトの施設栽培の大型化や周年化によって病原菌の伝染環が遮断しにくくなったことや、特異性の高い薬剤の普及に伴って、これまでは潜在的に抑制されていた葉かび病が重要病害となっている。本菌は、宿主植物がもつそれぞれの抵抗性遺伝子に対応した病原性系統（レース）が多く存在するため、世界的にも植物寄生性の分化が進んだ糸状菌として最も研究されている植物病原菌のひとつである。本病害は空気伝染性であることから、新レースが国内で発生すると全国に急速に被害が拡大するため、大きな問題となっている。

２．病徴

初期には、葉の裏側に白～黄色の円形または不定形の病斑に、灰～茶、黄土色または紫色の菌叢ができ、さらに進行すると葉の表側にも黄斑を生じる（図１A～C）。病勢が激しいと下位葉から枯れ上がり、生育不良・着果不良を起こす。高湿度・気温２０度でよく発病するが、１０～３０度でも湿度が高ければ発病条件を満たす。そのため密植や過度の灌水によって湿度が上がりやすい状態であったり、外気が低温で十分に換気できない施設栽培の秋～春および梅雨時期によく発生する。病斑上で無性胞子を大量に形成し（図１D）、風などで飛散して伝染する。本菌は気孔から感染し、発病まで約２週間と潜伏期間が長い。また、全く同様の病徴を示すトマトすすかび病菌（*Pseudocercospora fuligena*）は、発生条件も酷似しており、顕微鏡により菌体を観察しないと見分けることは困難である。すすかび病は、葉かび病抵抗性遺伝子に関係なく発病することが報告されている（黒田・鈴木 2005）。

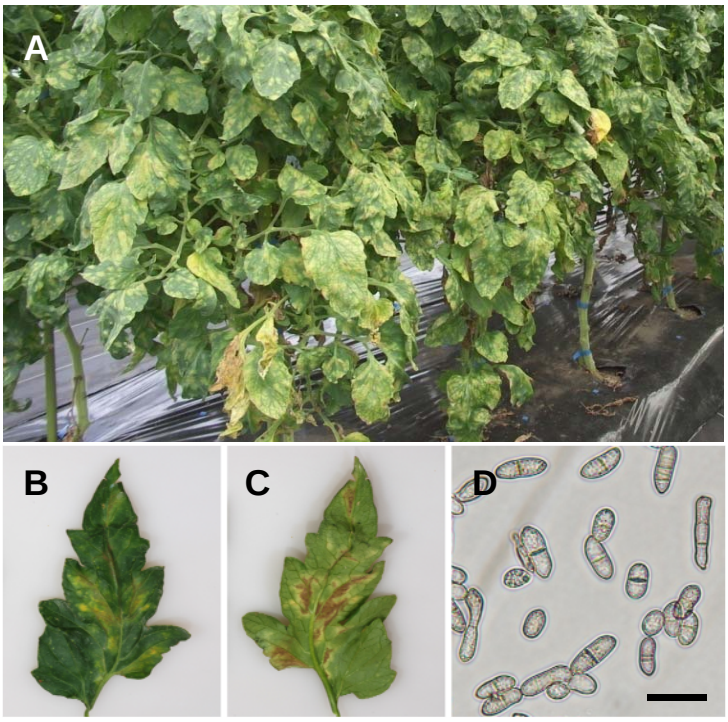


図１．トマト葉かび病の病徴.
葉かび病は下位葉から枯れはじめ（A）、葉の表裏（B および C）に大量の無性胞子を形成する（D）．*Bar* 20 μm.

３．分類

トマト葉かび病菌の学名は、これまで多くの論争がなされてきた。元々は Cooke によって形態学的に *Cladosporium* 属に分類され、*Cladosporium fulvum* と命名された（Cooke 1883）。後に Ciferri によって *Fulvia fulva* に改名されたが（Ciferri 1952）、さらに近年、分子系統学的解析により *Passalora* 属に移され *Passalora fulva* となり、一応の決着を迎えた（Braun *et al.* 2003）。本来ならば *Passalora fulva* を学名として用いるのが最も適当であるが、100 年以上もの長い間、*Cladosporium fulvum* という学名が世界中の研究者に利用されてきたため、現在でも国際的に最も広く使用されている。しかしながら、今後も混乱を避けるために異名（synonym）として *Passalora fulva* と併記する必要がある。

例：*Passalora fulva* (Cooke) Braun [syn. *Cladosporium fulvum* Cooke]

４．国内発生レース

葉かび病菌は、宿主であるトマトが持つ抵抗性遺伝子（*Cf* 遺伝子）に、遺伝子対遺伝子（gene-for-gene）説に基づいて対応するレースの分化が認められる（５．新レース発生のメカニズムで詳述する）。これまで *Cf* 遺伝子は、トマトの野生種などから 24 個見つかっているが、抵抗性反応が不明瞭なものや、遺伝子の重複、また分離が不確実なものも含まれ、現在では 6 遺伝子とされている（表１）（Lindhout *et al.* 1989）。レースの判別には、表１に示す 7 つの判別品種を用いて発病の有無により決定するのが一般的である。葉かび病菌のレース表記は、例えば抵抗性遺伝子 *Cf-2* を持つ品種を侵すレースをレース 2、*Cf-2* と *Cf-4* を持つ品種を侵すレースをレース 2.4 と表す（表 1）。

表１．トマト葉かび病抵抗性遺伝子と国内レース分化

検定品種	抵抗性遺伝子	抵抗性[a]								
		0	2	4	2.4	2.9[b]	4.9[b]	4.11	2.4.11	4.9.11[b]
Potentate	-	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Vetomold	*Cf-2*	R	S	R	S	S	R	R	S	R
Purdue 135	*Cf-4*	R	R	S	S	R	S	S	S	S
Moneymaker-Cf-5	*Cf-5*	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Ontario 7818	*Cf-6*	R	R	R	R	R	R	R	R	R
Moneymaker-Cf-9	*Cf-9*	R	R	R	R	S	S	R	R	S
Ontario 7716	*Cf-4*, *Cf-11*	R	R	R	R	R	R	S	S	S

[a] S、 感受性; R、 抵抗性.

[b] 2007 年にレース 4.9 および 4.9.11、2008 年にレース 2.9 が新たに発生した.

我が国における葉かび病菌の最初の報告は岸國平によるものであり、全国から収集した菌株は全てレース 0 のみであった（岸 1962）。1970 年代に入ると抵抗性遺伝子が導入された品種が市販されたこともあり、レースの多様化が進み、これまでに国内では 9 種のレースが報告されている（表１）。中でも、レース 4.9、4.9.11 および 2.9 は海外での報告がない日本特有の新レースである（Enya *et al.* 2009、Iida *et al.* 2010）。葉かび病菌は、種子への付着等により種子伝染するとされてきたが、むしろ国内において突然変異により新レースへ

と進化したと推測されている。それぞれの地域で分布するレースを把握することは、抵抗性品種の選定にも重要な情報である。海外では古くからレースの多様化が報告されており、*Cf-6* 以外の全ての抵抗性を打破するレースも単離されている。そのため今後、国内で新たな抵抗性品種が市販されたとしても、それが *Cf-5* 抵抗性の場合は新レースが直ぐに発生することが予想される。

５．新レース発生のメカニズム

葉かび病に限らず、多くの病害抵抗性品種には単一の優性な真性抵抗性遺伝子が導入されており、これら特定の品種を用いての栽培が普及してきた。しかしながら、このような単純化した栽培体系が、病原菌の変異によって生まれる新たなレースの発生と優占化を招き、激甚な被害をもたらすことが多い。新レースは、宿主植物の病原菌認識機構を回避することで発生する。つまり、宿主植物の持つ真性抵抗性遺伝子（R 遺伝子）に、抵抗性を誘導する病原菌の非病原力遺伝子（AVR 遺伝子）産物が認識されることで抵抗性が発揮されるが、病原菌は AVR 遺伝子を欠失または変異することで、親和性レースとして感染を成立させる。このような宿主植物の R 遺伝子と病原体の AVR 遺伝子の間の特異的対応関係は、遺伝子対遺伝子説（gene-for-gene theory）と呼ばれ、Flor によって提唱された（Flor 1956、島本ら 2004）。1992 年 de Wit 博士らのグループは、葉かび病菌感染トマト葉のアポプラスト液から *AVR 9* を精製・単離した。その後、対応するトマトの R 遺伝子 *Cf-9* も同定され、遺伝子対遺伝子説の分子遺伝学的実証に成功した（Thomma et al. 2005）。では、なぜ病原菌は自身の感染を妨げるような AVR 遺伝子を持っているのだろうか。現在では、本来 AVR 遺伝子は病原菌の病原性発現に必要な因子であり、宿主植物が病原菌認識のターゲット因子として利用するようになったと考えられている（AVR 二元説; Ponciano *et al.*2003、露無ら 2003）。葉かび病菌の抵抗性誘導因子（エリシター）には AVR 遺伝子群の他に、ECP 遺伝子群も単離されている。

５－１．AVR 遺伝子

葉かび病菌の場合、4 つの AVR 遺伝子（*AVR2*、*AVR4*、*AVR4E* および *AVR9*）が同定されている。これら遺伝子は主に欧州から分離された 81 菌株において、塩基配列の欠失や塩基置換による多様な変異が蓄積していることが明らかになった。同じレースでも菌株によって変異様式が異なり、また AVR 遺伝子が他の遺伝子と比較して変異しやすいことが示唆された（Stergiopoulos *et al.* 2007）。また交配による組換えも示唆されているが、本菌の有性世代は今のところ見つかっていない。以上のように、AVR 遺伝子における高頻度の変異によってレースの分化が起こり、抵抗性品種の画一的な栽培による淘汰圧によって新レースが局地的に急速に蔓延すると推測される。国内においては、トマトの品質や作業の面などにより抵抗性遺伝子を持たない品種も栽培されており、局地的に蔓延した各レースがこれらの抵抗性遺伝子を持たない品種で混在して生存していくことが推察される。

５－２．ECP 遺伝子

ECP（extra cellular proteins）遺伝子産物は全レースが分泌するとされ、これまでに *ECP1*、*ECP2*、*ECP4*、*ECP5* および *ECP6* が同定されている。いずれも低分子ペプチドをコードしており、宿主植物であるトマトからは特異的抵抗性を誘導する *Cf-ECP* 遺伝子群の存在が示唆されている（Soumpourou *et al*. 2007）。これまでに ECP 遺伝子群の塩基配列に欠失または

転写・翻訳に影響を示す突然変異は見つかっていない（Stergiopoulos et al. 2007）。レース特異的な AVR 遺伝子と比較して ECP 遺伝子は、レース非特異的なエリシターであり、今後有効な抵抗性ターゲットとなる可能性を秘めている。

６．防除法

近年の葉かび病の顕在化は、殺菌剤の使用回数が減り、抵抗性品種に頼った栽培系が推し進められたことが原因である。防除にあたっては、抵抗性品種の利用だけでなく、資材消毒、耕種的防除、殺菌剤の使用を組み合わせる必要がある。本病害はトマトのみに発生し、他の植物体上では長期間生存しないことが確認されており（Thomma *et al.* 2005）、一次伝染源は罹病トマト葉や施設資材であると考えられる。また、トマトでは有効な殺菌剤が登録されているが、ミニトマトでは少ないのが問題となっている。

６－１．資材の消毒

葉かび病菌は、施設内のガラス・ビニール・金属・プラスチックなどの様々な資材の表面に付着して越冬するほか、罹病葉上でも生存し二次伝染源となるため、特に多発時には、栽培終了後に施設内資材の消毒を行うことも重要である。また種子の表面にも付着するため、種子伝染するとも言われている。

６－２．抵抗性品種

葉かび病抵抗性遺伝子を持つ多くの品種が市販されている。新たな抵抗性遺伝子を導入した品種が普及した後、数年間は葉かび病の発生を防いでいるが、これまでに国内で販売された品種がもつ抵抗性は全て打破されており、導入された抵抗性遺伝子に対応したレースの発生が認められている。発生したレースの分布を把握し、その地域ごとに最適な品種を使用する必要があるが、抵抗性品種にのみ依存した防除法では防ぎきれず、むしろ新たなレースを発生させる主要因になってしまう（５．新レース発生のメカニズム参照）。

種苗メーカーによっては、品種が持つ抵抗性遺伝子を公開していなかったり、*Cf* 遺伝子のナンバーが国際的に認められているものとは異なっているなどの問題もある。

６－３．耕種的防除

過度の灌水、密植を避け、日中気温の高いときを見はからって、できるだけ換気を行ない多湿にならないようにする。換気をおろそかにし薬剤だけに頼ると、防ぎきれない。また地下給水やチューブ灌水を行ない、地表をビニールやポリシートでマルチすると、葉かび病だけでなく灰色かび病、疫病やその他の病害の発生も結果として少なくなる。発病葉は施設外で埋める等して二次伝染に注意する。肥料切れになると発病しやすくなるので、肥培管理に注意し、草勢が衰えないようにする。収穫期の肥料不足には特に注意する。

６－４．殺菌剤

殺菌剤の使用は、中位の葉に病斑がみえるようになってからでは手おくれであるため、基本的に予防に重点を置き、発病前から定期的に散布する。浸透性が高い等の理由で、発病初期に限って治療効果が高い剤もある。葉かび病菌は気孔から侵入するため、気孔が葉裏に多数存在するトマト葉では、薬剤が葉裏に十分付着するようにする。発病が予想される場合は苗床期から、薬剤を散布して予防する。

同一作用機作を示す薬剤を連用すると耐性菌を生じる可能性が高まるため、作用機作の異なる薬剤を交互に散布する。サルバトーレ ME、トリフミン水和剤、ルビゲン水和剤は

EBI 剤というグループに、ベンレート水和剤とトップジン M 水和剤はベンゾイミダゾール系剤というグループに属する。既にアジキシストロビン水和剤に対する耐性菌の発生が報告されており、今後使用地域での耐性菌の存在に注意を払う必要がある（渡辺 2009）。また、インプレッション水和剤やエコショットが、葉かび病に対して防除効果のある微生物農薬として登録されている。

おわりに

葉かび病菌が属す *Cladosporium*（*Passolora*）属菌は空中飛散性の常在菌とされ、多くはアレルゲンとしての報告があり、葉かび病菌もその例外ではない（Samsoe-Jensen 1955）。特に栽培期間が長く、登録農薬も少ないミニトマトにおいては、閉鎖環境であるハウス内での胞子の蔓延は、作業者のアレルゲンとしても脅威となる。非病原性の同属菌は、風呂場やエアコンダクト等の競合相手となる他菌が少なく、湿度の高い場所を好んで生活している。そのため施設内の資材の上は、葉かび病菌にとっての棲み家となりやすい。施設内での葉かび病胞子のモニタリングが試みたが、本菌は他菌と比較して栄養成長が著しく遅く、また形態的に区別のつかない同属菌も空中常在菌であるため、葉かび病菌の検出は困難であった。病害防除のみならず、作業現場における胞子密度を下げる意味でも、またレースの多様化を防ぐためにも、今後も葉かび病に対する化学農薬の使用は避けられない。

近年、新たな防除法として、新レースが出現しにくい抵抗性機構の解明や抵抗性遺伝子の単離、抗体を用いた治療法などが、また検出法として PCR による簡易的なレース判別法などが研究されているが、まだまだ実用的な段階ではない。今後、これらの技術開発が発展することを期待したい。

引用文献

1. Braun *et al.* (2003) Phylogeny and taxonomy of *Cladosporium*-like hyphomycetes、 including *Davidiella* gen. nov.、 the teleomorph of *Cladosporium* s. str. Mycol Progr 2:3-18
2. Enya J. *et al.* (2009) First occurrence of leaf mold of tomato caused by race 4.9 and 4.9.11 of *Passalora fulva* (syn. *Fulvia fulva*) in Japan. J. Gen. Plant Pathol. 75: 76-79.
3. Flor (1956) Mutations in Flax Rust Induced by Ultraviolet Radiation. Science 124: 888-889.
4. Thomma P. H. J. B. *et al.* (2005) *Cladosporium fulvum* (syn. *Passalora fulva*)、 a highly specialized plant pathogen as a model for functional studies on plant pathogenic *Mycosphaerellaceae*. Mol. Plant Pathol. 6(4): 379-393.
5. Iida Y. *et al.* (2010) Occurrence of a new race 2.9 of leaf mold of tomato in Japan. J. Gen. Plant Pathol. 76. in press.
6. 岸國平 (1962) トマト葉かび病菌の寄生性分化に関する研究. 日植病報. 4: 189-196.
7. 黒田克利、 鈴木啓史 (2006) トマトすすかび病は葉かび病抵抗性に関係なく発病する. 平成 18 年度「関東東海北陸農業」研究成果情報.
8. Lindhout P *et al.* (1989) Further identification of races of *Cladosporium fulvum* (*Fulvia fulva*)

on tomato originating from the Netherlands, France and Poland. Neth J Pl Path 95:143-148.
9. Ponciano G *et al.* (2003) Bacterial Effectors in Plant Disease and Defense: Keys to Durable Resistance? Plant Dis. 11: 1272-1282.
10. 露無慎二ら (2003) 植物病原細菌の発病戦略と植物の 防御戦略. 化学と生物 41: 157-163.
11. Samsoe-Jensen T. (1955) Mould allergy; sensitization by special exposure illustrated by two cases of allergy to *Cladosporium fulvum*. *Acta Allergol.* 9: 38-44.
12. Soumpourou *et al*. (2007) Theor Appl Genet. 115: 1127-36.
13. 渡辺秀樹ら (2009) トマト葉かび病菌におけるアゾキシストロビン耐性菌の発生. H21 日植病大会講要: 152.

農林水産省委託農政課題解決研修「野菜の難防除病害虫に対する最新技術」資料

イチゴ炭疽病の診断技術と防除法

奈良県農業総合センター
岡山　健夫

１．はじめに

イチゴ炭疽病は西南暖地を中心に多発し、被害が拡大しているイチゴの最重要病害である。最近のイチゴ新品種は大果、糖酸度に富んだ濃厚な食味、浅い休眠特性、輸送性が良い果実特性など高品質で多収性に優れた品種特性が優先されており、その多くが炭疽病に対して抵抗性がなく、罹病性品種の拡大が被害の蔓延を招いている。

本病は、低温期に無病徴となる潜在感染株あるいは発病株残さや病原菌に汚染された土壌が主な第１次伝染源である。このため、健全親株の養成や親株更新が各地で実施されているが、潜在感染株の発見が難しく、感染株の混入が避けられない。そこで、筆者らは新たな農林水産事業を推進する実用技術開発事業（H18～20）により、千葉県農業総合研究センター、農業環境技術研究所と共同研究に取り組み、*Glomerella cingulata*(不完全世代 *Colletotrichum gloeosporioides*)を対象に選択培地を作成して高頻度感染部位を特定し、病原菌特異的プライマーを設計してPCRによる潜在感染株の検出技術を開発した。ここでは、従来から実施している診断技術の概要を述べるとともに、研究結果並びに防除法を紹介する。

２．診断技術

（１）炭疽病の発生様相

イチゴ炭疽病の初発生時期は、奈良県の露地では最高気温が概ね24℃以上となる５月下旬以降である。初期症状は、親株として植えられた潜在感染株の葉や葉柄に病斑を形成し、親株から発生したランナーの一部が黒変した、くぼんだ病斑を形成する。育苗圃では梅雨期以降、病斑上に分生子を形成し、雨滴によって飛散して徐々に発生が拡大する。発病適温は28℃であり、高温多湿条件が続くと発病株の小葉、葉柄やランナーに分生子堆を形成する。８月中旬以降になると、多湿条件によって分生子形成が助長され、混み合った苗に感染して坪状に枯死株が発生する。この時期の蔓延は急激で、雨滴やしぶきによって分生子が飛び散り育苗圃全体に蔓延する。伝搬は降雨だけでなく、8～９月の頻繁な頭上灌水によって分生子が飛散し、感染範囲を拡大させて被害を助長していることも多い。定植期

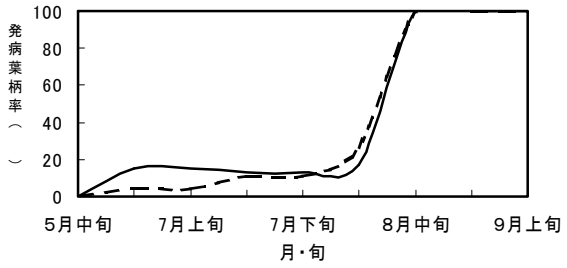
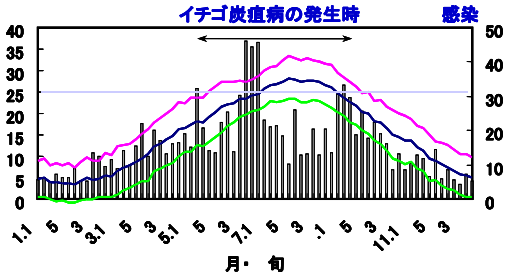


図1　圃におけるイチゴ炭　病の発生 a)
－－ 汚染圃場　―― 接種
a)5月中旬に接種　お　び汚染圃場に健全　を植え　けた



日　算　量　日
図2　の　象条（　）とイチゴ炭疽病の発生時

の９月中旬になると大半の苗が萎凋枯死し、採苗ができなくなることも多い（図１）。最高気温が 24℃を下回る９月下旬以降になると、発病は次第に終息する。10 月以降、感染苗は外見上無病徴となるため健全株と識別ができず、定植苗として本圃に植えたり、翌年の親株として使われる（図２）。このような無病徴感染株は、本圃ではビニール被覆後の高温によって急激に萎凋し、枯死株が多発して甚大な損失を招く。また、親株として使われると、イチゴの株で炭疽病菌が越冬し、翌年の第１次伝染源となる[14]。

（２）潜在感染株の培養による診断方法

潜在感染株は、鉢植え子苗をビニール袋に入れて 25～28℃の高温多湿状態を１～２週間保って発病を促し、葉や株の中心部に形成する分生子を確認することで検出できる[11]。しかし、この方法は株の衰弱を招きやすく、大量の苗を扱うことが難しい。石川は、アルコール浸漬法により葉で検出する方法を開発し、無病徴感染株を検出する簡易法として利用されている[9]。しかしながら、これらの培養方法によって検出する分生子には、胞子形態が同一の非病原性菌が分離されることがしばしばある[2,23]。しかもこれらの非病原性菌は *C. gloeosporioides* の種特異的プライマーを使った PCR[1]で検出されるため、病原性を接種によって一々確認する必要がある。そこで、筆者らは共同研究により炭疽病菌特異的プライマーを設計し、これを用いた PCR による診断法を開発した．その前段階として、高精度診断に供する炭疽病菌の高頻度感染部位を特定するために選択培地を作成し、潜在感染株の高頻度感染部位を明らかにした。

（３）選択培地による高頻度感染部位の特定と感染頻度の時期別変動

潜在感染株における炭疽病菌の感染部位を知るために、供試菌株としてベノミル耐性イチゴ炭疽病菌を用いて選択培地を作製した[17]。培地の作製には、基礎培地として PSA を用い、ベノミル 50ppm、トリフルミゾール 30ppm、オキシガル 100ppm、ストレプトマイシン硫酸塩 50ppm を添加した。選択培地を用いて炭疽病菌を分離した結果、潜在感染株や発病枯死株の小葉、葉柄、葉柄基部から高率に炭疽病菌が分離され、クラウンや鉢土からも分離された(表１)。この選択培地は植物体からの検出や動態調査に適するが、感性菌の検出やコンタミしやすい土壌からの分離、定量には、*Colletotrichum acutatum* を対象に作製された、改変 Mathur’s 培地[3]の方が使いやすい。

選択培地を用いて、10 月以降に潜在感染状態となった外観健全株を供試し、12～4 月に炭疽病菌を分離して感染部位を調査した。その結果、炭疽病菌は小葉、葉柄、葉柄基部から高率に分離され、部位による分離頻度の差はほとんどなかった。分離頻度は、外側葉位の小葉や葉柄、葉柄基部から高率に分離され、内側の新生葉位になるほど検出率が低下したが、最も新しい小葉や葉柄、葉柄基部からも分離された[19]。時期別に潜在感染株から炭疽病菌の分離を試みた結果、炭疽病菌は小葉、葉柄、クラウンで越冬し、翌春まで高率に潜在感染して生息することが明らかになった。また、分離率は年内が高く、越冬後は減少することが明らかになった[18]（図３）。

表1　　培　お　び　　培　に　る　　感染　、枯　　お　び　土培　土からのイチゴ炭疽病菌の分　　比較[1)]

培　　イチゴの植物体	分　率( )									
	葉		葉柄		葉柄		ラウン		土培　土	
培　　感染	80.0	.4	0.0	6.1	100	0.0	5.0	16.6	25.0	6.5
枯	70.0	.4	80.0	.4	100	0.0	0.0	6.1	25.0	7.
感染	50.0	15.8	0.0	15.8	7.5	6.5	12.5	11.2	0	
枯	0		0		25.0	11.2	25.0	1 .4	0	

数　は　　感染　は、ベノミル　性炭疽病菌の10　mlの分生子を　た 10ml　接種して作製した　葉、葉柄、葉柄　の 4　を分　に用い、 5　を　した

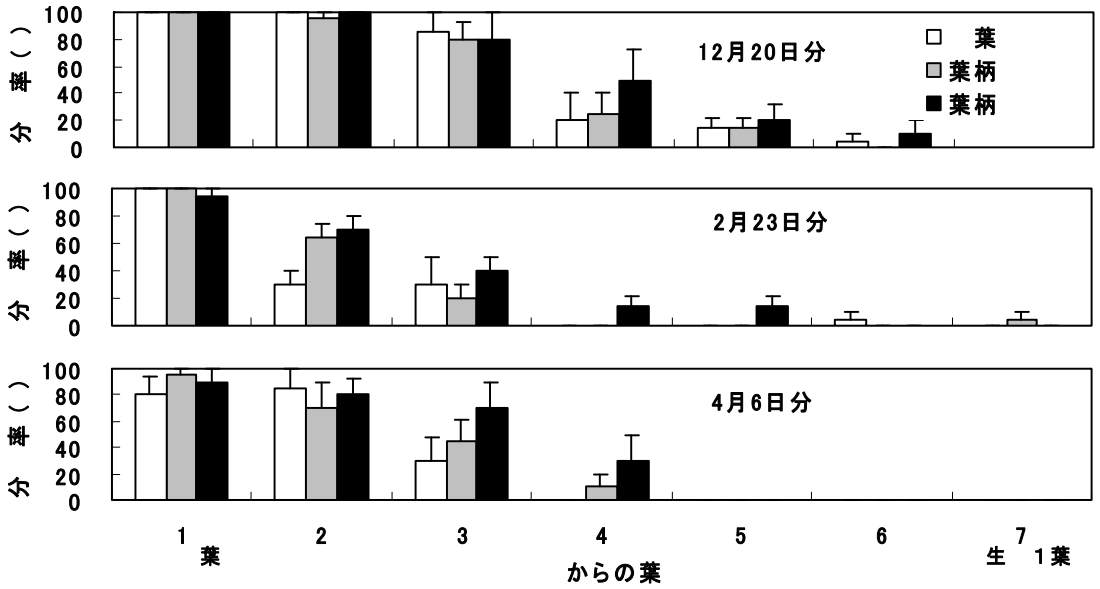


図3　イチゴ炭疽病　　感染　の時　別お　び葉　別の分　率[18)]

感染　は、月22日にベノミル　性炭疽病菌の10^5 mlの分生子を　た 10ml　接種して作製し、　けハウス内に　いて　上　水で　した 分　は　葉　の　葉、葉柄を 4　、葉柄　は 2 4　を培　し、 時とも5　を　した

３．病原菌特異的プライマーを用いた PCR 法による診断技術

（１） イチゴ炭疽病菌特異的プライマーの開発

次に、千葉県農業総合研究センターの鈴木らが設計したイチゴ炭疽病菌特異的プライマーの開発について紹介する。まず、病原菌特異的プライマーを設計するために、イチゴに対して病原性を有する炭疽病菌と非病原性菌について rep-PCR による多型解析を行ったところ、ほとんどの病原性菌株は比較的似た泳動パターンを示した(図４)。また、病原性菌株にのみ共通して出現するバンドの存在が認められた[21)]。そこで、vectorette PCR を用い、この PCR 産物を含む 1,009bp の塩基配列を決定した。この配列を基に病原性菌株と非病原性菌株のゲノム DNA を調査したところ、菌株間で異なる配列部分が確認できた。この病原性菌株に特異的な配列部位をターゲットに、病原性菌株検出プライマーAP-N1 と AP-r7 を作製した。このプライマーを用いて *C.gloeosporioides* の検出を行ったところ、イチゴに対し病原性を確認している菌株 55 菌株中 54 菌株から特異的増幅バンドが認められた（図５）。

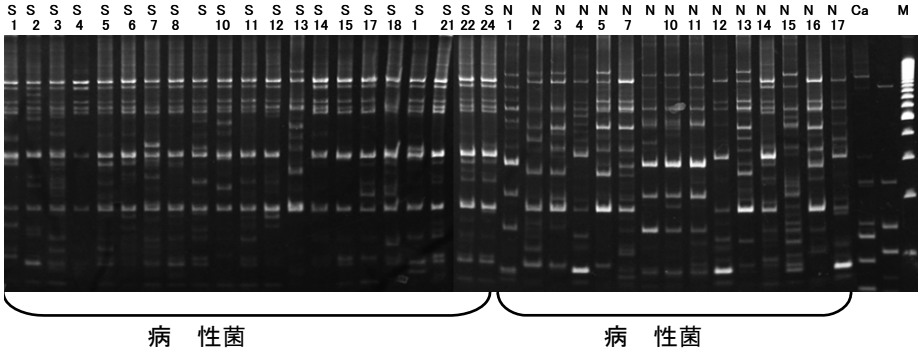


図４　eric2 プライマーによる rep-PCR 結果（千葉農総研セ、鈴木）
M：200bp ラダー　S1～24：病原性菌株　N1～17：非病原性菌株

一方、非病原性菌株 34 菌株については、33 菌株では増幅が認められなかったが、1 菌株のみ増幅バンドが認められた。また、イチゴ以外の宿主から分離した *C.gloesporioides* 21 菌株について試験したところ、イチゴに対し病原性が確認された菌株はすべて特異的バンドが認められた。

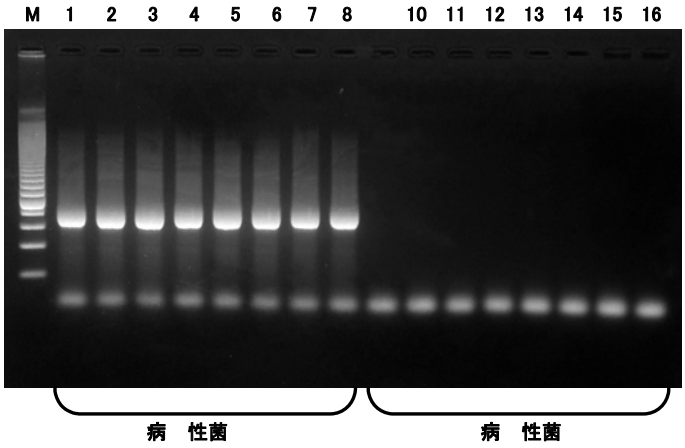


図５　APN1-Apr7 プライマーによるイチゴ炭疽病菌の検出（千葉農総研セ、鈴木）

M:200bpラダー分子量マーカー
レーン1～８：病原性菌株
レーン9～16：非病原性菌株

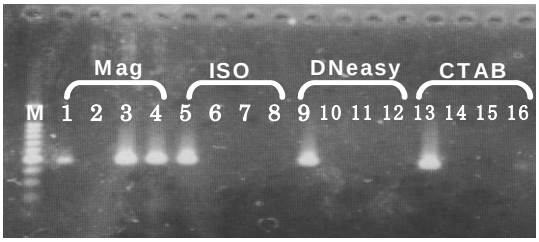
（２）病原菌特異的プライマーを用いた PCR による検出

鈴木らが設計した病原菌特異的プライマーを用い、イチゴ株からの検出を行った。イチゴは PCR 阻害物質が多いため低菌密度の炭疽病菌を検出するのは難しかった。そこで、前培養と DNA の抽出条件を最適化し、イチゴに潜在感染した本菌の PCR 検出技術を開発した[5)]。

試料の採取部位は、高頻度感染部位で腐敗しにくい外葉の葉柄基部が適した。葉柄基部に付着している土壌は水道水で取り除き、汚染がひどい場合には、前培養に用いる PS 培地に 50ppm ストレプトマイシンを添加する。前培養は葉柄基部切片を培養液に浸漬し、軽く振とうさせて培養する。ここではより検出精度が高い nested-PCR を紹介する。検出用プライマーはイチゴ炭疽病菌特異的プライマーを用い、1stPCR に AP-N1、AP-N2、2ndPCR に AP-N1、

AP-7R を用いた。

設定したイチゴ炭疽菌検出プロトコールは、以下のとおりである。すなわち、イチゴ外葉の葉柄基部切片を試料とし、80%エタノールで 30 秒間の表面殺菌後、PS 液体培地 0.3ml を入れたマイクロチューブで 28℃、２日間静置培養を行なう。培養液をマイクロピペットで除去し、葉柄基部切片を Mag Extractor-plant genome-を用いて DNA を抽出する（図６）。抽出液を鋳型にして 1stPCR、さらにその反応液を鋳型にして 2ndPCR を行い、1.5%アガロースゲルで電気泳動を行う[6]。本法は、潜在感染株からのイチゴ炭疽病菌の検出が約 4 日間ででき、奈良県では原種株の検定に用いている。



1～4：MagExtractor-plant genome-（東洋紡）
5～8：ISOPLANT□（ニッポンジーン）
9～12：DNeasy Plant Mini Kit（QIAGEN）
13～16：CTAB 法
1, 5, 9, 13：炭疽病菌体 50mg、2, 6, 10, 14：イチゴ小葉 50mg
3, 4, 7, 8, 11, 12, 15, 16：炭疽病菌体 50mg+イチゴ小葉 50mg
M：100bp ladder marker
炭疽病菌体は、PS 培地で 4 日間振とう培養して用いた。
イチゴ小葉は、品種‘アスカルビー’を用いた。

図６　ＤＮＡ抽出方法の違いによるＰＣＲ検出状況（奈良農総セ、平山）

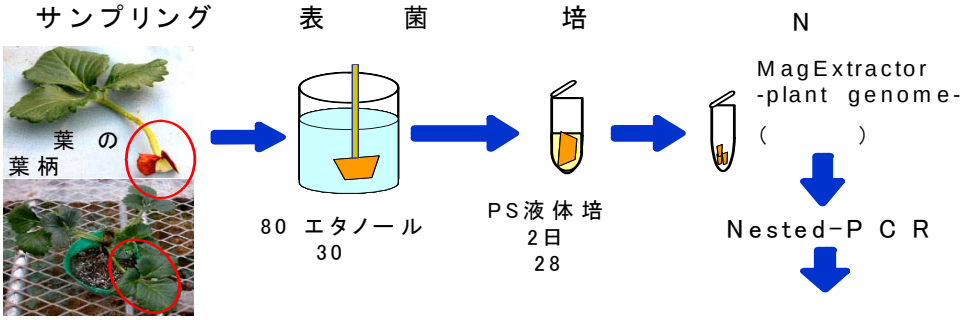


図７　PCR によるイチゴ潜在感染炭疽病菌検出プロトコール（奈良農総セ、平山）

３．防除法

（１）雨よけと底面給水による防除

潜在感染株の発病や発病後の蔓延防止にはイチゴの地上部に水滴がかからない雨よけと底面給水による灌水が極めて有効である[15]。表２に示したように、雨よけハウスのスプリ

表２　イチゴ炭疽病の発病に及ぼす雨よけハウスの底面給水およびスプリンクラー灌水の影響[14]

灌水法	親株の感染状態	親株[a] 発病葉柄率（%）	親株[a] 発病葉率（%）	発病苗率（%） 第１子苗	第２子苗	第３子苗	第４子苗
底面給水[a]	潜在感染株[b]	6 bc[e]	0 b	0 c	0 c	0	0
	潜在感染株[c]	44 bc	38 b	0 c	0 c	0	0
	接種株[d]	100 a	100 a	29 b	7 c	0	0
	無接種	0 c	0 b	0 c	0 c	0	0
スプリンクラー灌水	潜在感染株[b]	31 bc	75 a	100 a	100 a	75	-
	潜在感染株[c]	56 ab	79 a	100 a	80 b	100	-
	接種株[d]	100 a	100 a	93 a	92 ab	83	90

a)供試親株４株の平均．育苗は雨よけハウスで行い，４月から８月までそれぞれの灌水法で管理し
ｂ）前年１１月に接種し，越冬した親株．
ｃ）当年３月に接種した親株．
ｄ）当年６月にランナーが発生している親株に接種．
e)同一英小文字間にはDuncan's multiple range test(P=0.05)で有意差がないことを示す．

ンクラー潅水区では育苗中の接種株だけでなく、すべての潜在感染株が発病し、親株の発病後急速に子苗に伝染した。ランナー、子苗も激しく発病し、親株の接種時期に関わらず高率に発病した。一方、底面給水区では育苗中に接種した親株は発病してすべてが枯死したが、3月に接種した潜在感染株や前年11月に接種した越冬潜在感染株の発病は少なかった。育苗中に接種した親株から発生した子苗は、第1子苗の29%が発病し、第2子苗の発病は7%にとどまった。潜在感染株から発生したランナーは、発病親株に近接した部分にのみ黒変が認められたが、子苗は発病しなかった[12)]。

炭疽病菌はスプリンクラー区のランナーから高率に分離されたが、底面給水区のランナーでは、親株から離れるほど顕著に分離頻度が低下した。

底面給水は、不織布を鉢底に敷いて灌水チューブを下向きに置いて毛管水で鉢底から給水させる灌水法である。この育苗法はイチゴの地上部に水滴がかからないため、潜在感染株の発病が抑制され、万一発病株が混入しても分生子形成が阻止されて育苗中の蔓延を防ぐことができる。イチゴの地上部に水がかからないように不織布を利用した給水方法には、様々な工夫がなされている[24)]。

（2）潜在感染親株の早期除去と第一ランナーの親株利用

潜在感染株から子苗への感染を防ぐ簡単な方法には、育苗圃において潜在感染が疑われる親苗を早期に除去する方法が勧められる。炭疽病の発病様相で示したように、奈良県の露地での初発時期は5月下旬であり、初発時期以前に発生した第1子苗を親株にすることによって潜在感染親株から子苗への炭疽病菌の伝搬を防ぐことが可能である（表2）。親株の処分時期が遅れるほど子苗への感染頻度が高まるので、育苗圃近くに元の親株を放置せず確実に処分することが重要である[16)]（図8）。

表3　イチゴ炭疽病無病徴感染　の除時　と子　の発病

の除（月日）	発病　率（　）	発病	子　数
5月30日	0	0	6
6月10日	13.7	6.4	44
6月20日	7.4	75	3
無	8.4	65.	63

５月３０日除去　　６月２０日除去

図８　潜在感染親株の除去時期と子苗の発病

（3）障壁や発病株の遮へいによる伝搬防止

育苗圃の蔓延防止対策としては、垂直方向への分生子の飛散距離をもとに設置した40cm以上のビニール障壁で伝搬が減少する[13)]。このような障壁は隣接株への緊急避難的な回避策として実用性が高い。また、この方法は、農薬試験圃において無処理区からの発病株由来の分生子飛散を防ぎ、防除効果試験の精度向上に役立つ。現地の育苗圃では高温多湿時の病勢進展が激しく、発病株の抜き取り除去が遅れて蔓延することが多い。このような場合には、発病株を中心に周囲をビニールで覆い、伝染源を遮へいすると分生子飛散による蔓延を防ぐことができる[15)]。

（4）薬剤防除

薬剤散布による防除効果は、降雨がかかる露地育苗と雨よけ育苗で大きく異なる。雨よ

けとイチゴ地上部にまったく水滴がかからない底面給水による育苗では、炭疽病を対象とした薬剤散布はほとんど必要ない。しかし、スプリンクラーで頭上灌水を行うと育苗環境が露地条件に近く、薬剤散布が必要になる。

薬剤は感染前処理が有効な保護剤と感染株にも有効な薬剤がある。プロピネブやマンゼブ、イミノクタジンアルベシル酸塩、有機銅は予防効果が高く、効果が７～10 日間持続する[7,10]。一方、ベノミルやチオファネートメチル、ビテルタノール、アゾキシストロビンは感染株に対する効果が期待できる。しかしながら、感染株に有効な薬剤は耐性菌が出現しやすく、ベノミル耐性の炭疽病菌[22]は 1990 年代に各地で高率に発生している。ビテルタノールは 1990 年代に比べ防除効果が劣る傾向が見られる。アゾキシストロビンは 2004 年に耐性菌の発生が報告され[8]、地域によっては使用に耐えられなくなってきている。さらに、ベノミルやチオファネートメチル耐性菌に有効なジエトフェンカルブ・チオファネートメチルは有効な地域が多いが、過剰使用による耐性菌の発生が懸念される。

ジエトフェンカルブ・チオファネートメチルは、潜在感染株の発病前の４、５月に処理すると無処理に比べ１ヶ月以上初発が遅延し、本圃定植直前に散布すると枯死株の発生を抑えた[24]。本病は病勢進展が激しい高温期の露地育苗では薬剤防除だけでは食い止めにくく、しかも蔓延時に頻繁に使うと耐性菌の出現を助長する恐れがある。感染株に有効な薬剤は限られており、処理時期の選択や防除手段を見極めて対処することが重要である。

（５）発病枯死株、汚染土壌からの検出とその対策

本菌は、乾燥した罹病枯死株では８ヶ月以上生存し[14]、分生子で汚染した鉢土培養土にも１ヶ月以上生存して、子苗を植えると根やクラウンから侵入して発病した[19]。

枯死株や汚染土壌に対する対策として、育苗圃の土壌くん蒸処理はクロルピクリンやメチルイソシアネートが有効である[14]。本圃では多くの土壌病害に有効な太陽熱を利用した施設内の土壌消毒が本病にも高い効果がある。また、本菌は乾燥組織の状態では長期間生存するが、湛水して植物体が腐敗すると検出されなくなり、速やかに消失する。

お　わ　り　に

我々は 3 年間の共同研究によって、PCR による病原菌の高精度検出技術を開発した。今年度からはイチゴ主産県や大学の参画により、本法の普及定着とその改良、疫病、萎黄病を含めた検出技術の開発を進めている。これまでに述べたように培養法による診断は、簡易であるが病原性の確認が不可欠である。これに対し、病原菌特異的プライマーを用いた検出法は､現在のところ経費はかかるものの､感染株のみを確実に検出できる技術であり、その利用が全国に広がることによって我が国の本病の発生被害が抑制できると考えている。

しかし、これまでの研究によってイチゴ炭疽病菌は潜在感染だけでなく、多くの植物に無病徴で定着し、枯死葉で分生子が増殖することが明らかになっている[4]。一方、前述したようにイチゴには炭疽病菌と類似した非病原性の *C. gloeosporioides* 菌が多数定着していることも明らかになった。病原菌特異的プライマーは潜在感染株の検出に止まらず、その動態究明の力強い武器であり、今後の研究ではこれを利用して生態究明を進め防除技術の低コスト化を目指したい。

引用文献

１）Adaskaverg, J. E. and Foster. H.(2000). Occurrence and management of anthracnose

epidemics caused by *Colletotrichum* species on tree fruit crops in California. In *Colletotrichum*: Host Specificity, Pathology, and Host-Pathogen Interraction (Prusky,d., Freeman,S., and Dickman,M.B.eds.)pp.317-336,APS Press, St.Paul, Minnesota.

２）海老原克介ら（2007）．育苗圃におけるイチゴ炭疽病の潜在感染率の推移と発病との関係同上．日植病報 73：41．（講要）．

３）Freeman, S. and Katan, T. (1997). Identification of *Colletotrichum* species responsible for anthracnose and root necrosis of strawberry in Israel. Phytopathology 87: 516-521.

４）平山喜彦ら(2008).各種雑草葉でのイチゴ炭疽病菌 *Colletotrichum gloeosporioides* の分生胞子形成．日植病報 74：70（講要）．

５）＿＿＿ら(2008)．病原菌特異的プライマーを用いた PCR による潜在感染株からのイチゴ炭疽病菌の検出．日植病報 74：198．（講要）

６）＿＿＿ら(2008)．前培養と nested-PCR による潜在感染株からのイチゴ炭疽病菌の検出技術．平成 20 年度近畿中国四国農業研究成果情報．

７）＿＿＿(2009)．アゾキシストロビン系薬剤耐性イチゴ炭疽病菌の発生状況と対策．植物防疫 63：494-498.

８）稲田稔ら(2004)．アゾキシストロビン剤耐性イチゴ炭疽病菌（*Glomerella cingulata*）の発生．日植病報 73：253（講要）．

９）Ishikawa, S. (2003). Method to diagnose latent infection by *Glomerella cingulata* in strawberry plants using ethanol. J Gen Plant Pathol. 69: 372-377. 69: 372-377.

10) 岡山健夫・西崎仁博(1990)．イチゴ炭そ病に対する薬剤散布後の期間と防除効果.関西病虫研報 32:77.

11)＿＿＿(1993)．加温によるイチゴ炭そ病潜在感染株の検定．奈良農試研報 24: 41-46.

12) Okayama , K. (1993) Effect of rain shelter and capillary watering on disease development of symptomless strawberry plants infected with *Glomerella cingulata* (*Colletotrichum gloeosporioides*). Ann. Phytopath.Soc. Japan 59: 514-519.

13）岡山健夫(1994).イチゴ炭そ病菌 *Glomerella cingulata*(＝*Colletotrichum gloeosporioides*)分生子の飛散および障壁による防除効果.日植病報 60: 113-118.

14) ＿＿＿(1994)．イチゴ炭そ病の病原菌，発生生態および発病制御に関する研究．奈良農試研報特別報告．1-128.

15)＿＿＿(1994)．イチゴ炭疽病の伝染環と発病制御技術．植物防疫 48:340～342.

16）＿＿＿ら（1997）．無病徴感染親株の早期除去によるイチゴ炭疽病の防除．日植病報 63．520（講要）．

17）＿＿＿ら(2007)．選択培地によるベノミル耐性イチゴ炭疽病菌 *Glomerella cingulata* の潜在感染株及び育苗培養土からの検出．日植病報 73：155-161.

18）＿＿＿ら（2007）．選択培地によるイチゴ炭疽病菌の潜在感染株および培養土における動態解析．近畿中国四国地域における新技術 7：28-30.

19)＿＿＿(2008)．イチゴ炭疽病潜在感染株の選択培地による検出と防除対策．植物防疫

62:140-143.
20)＿＿＿＿ら(2008)． イチゴ炭疽病感染株に対する定植前の薬剤処理による発病抑止効果. 日植病報 74：269（講要）.
21）鈴木健ら（2008）．イチゴから分離された *Colletotrichum gloeosporioides* の遺伝子多型と病原性. 日植病報 73：215（講要）.
22）手塚信夫・牧野孝宏(1989). イチゴ炭そ病の発生様相と防除. 関東東山病虫研報 36: 92-94.
23）植松清次ら（2002）．北海道の田畑輪換圃場を利用したイチゴリレー苗生産における *Colletotrichum gloeosporioides* の潜在感染とその病原性. 日植病報 68：201（講要）.
24）米本ら（2008）．親水性不織布を利用した灌水法のイチゴ炭疽病に対する防除効果. 日植病報 74：328-334.

リビングマルチとカバークロップを利用した露地野菜害虫・雑草の管理技術

東北農業研究センター
カバークロップ研究チーム
山下伸夫・小林浩幸

１．はじめに

近年、環境調和的な農業生産や食の安心・安全を求める声が高まる中、化学農薬に過度に依存せず、天敵利用等の生物的方法や誘殺トラップをはじめとする物理的方法などの技術を組み合わせ、害虫を経済的に被害が出ない程度に防除しようとする総合的害虫管理（IPM）が普及しつつある。特に土地利用型農業における害虫管理の方向としては、外来生物の生物相攪乱の危惧から土着天敵の利用が重要視されており、このためには、天敵類に悪影響の少ない薬剤を利用する(永井 1993、 Kohno et al.2007、 山下 2008)、積極的に土着天敵を誘引し、定着させ、天敵が好む環境を作り出すことが必要である(大野　2007、根本　2003)。また、害虫の作物への侵入・加害を軽減するため物理的・化学的障壁を作ることも有用な方法とされている。

また雑草害も畑作物や野菜栽培においては、病虫害とならび重大であるが、その防除作業の省力化や抵抗性発現の危惧などから防虫剤同様に除草剤使用の低減化が目指されており、生態的防除法をはじめとする新たな防除法の開発が待たれている。

リビングマルチとカバークロップ栽培は、収穫を目的としない被覆植物で作物の周りの地表を覆う栽培法であり、その被覆で風雨による土壌浸食を抑制したり、または緑肥として主作物への養分供給等に効果が認められている（Hartwig and Ammon 2002）。近年、カバークロップの新たな効果として、その被覆機能により天敵昆虫相等の増強や害虫の侵入を抑制する効果や、光競合等で雑草の生育を抑制する効果が注目され、それらを活用し虫害や雑草害を軽減する技術開発研究が注目を浴びつつある。本稿では、それらに関する研究の状況を紹介する。

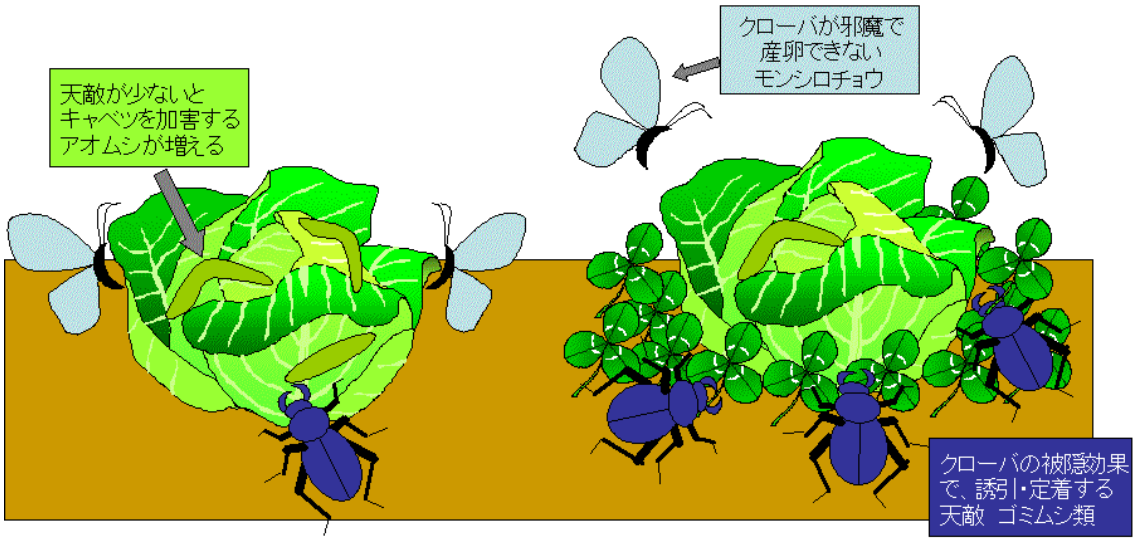
２．カバークロップとリビングマルチ

カバークロップ栽培は被覆作物を先に播種して主作物の栽培前に枯死させたり、鋤き込んだり、刈り敷くなど生育時期が殆ど重ならない体系をいう。リビングマルチ栽培は、被覆作物と主作物の生育時期が広く重なる栽培体系をいう。たとえば、以前、良く見られた水田の移植前の春のレンゲソウ作付はカバークロップにあたり、野菜や大豆など主作物の脇に収穫目的でないマルチ用麦や牧草等を混作、または間作的に作付するのはリビングマルチ栽培になる。

（写真１、左　シロクローバーをリビングマルチにしたスィートコーン栽培、
右　大麦をカバークロップとし刈敷いた大豆栽培）

３．リビングマルチが虫害を軽減させるメカニズム

リビングマルチでは、主作物と被覆作物の複数種の植物が同時期、同一場所で生育することになるが、このような複数の植生が混在する条件においては、後述のように害虫の密度が低下する事例が知られている。このメカニズムとしては、天敵相増強効果と資源の分断・侵入阻害効果が有力と考えられる。実際は、リビングマルチが、どちらかだけの効果だけでなく両方の機能を発現していることも多いと考えられる。カバークロップでも、天敵相の越冬生存率を高めたり、土壌小動物を繁殖させることで天敵相を増強することに寄与すると考えられる。



（図　リビングマルチの天敵相増強効果と資源の分断、侵入阻害効果）

１）天敵相増強効果

リビングマルチなど人為的に設けた植生が天敵相を誘引、または増殖に有利な環境をつくり、天敵相を増強させ、捕食や寄生効果を高め害虫密度を抑制する。

植生が天敵を誘引するメカニズムについて解析的に詳しく調べた研究は少ないが、一般的に植生が湿度や温度の激変を軽減し安定した生息環境、天敵から逃れるかくれが、害虫が少ないときの代替え餌を提供することが考えられる。例えば、植生を設けることで腐植・有機物が豊富になり、それを餌とするトビムシ等の土壌小動物が増加し（Hartwig and Ammon 2002、 Nakamoto and Tsukamoto 2006)、捕食者にとっての代替え餌になる。またリビングマルチの花蜜や花粉がヒラタアブ類や寄生蜂を誘引する。

２）資源分断および侵入阻害効果

作物が単作で集中して分布すると作物害虫が誘引されやすく、また増殖につながるが、混作などで作物分布が分断されると、害虫にとっての餌資源の集中度が低下し、餌利用効率が小さくなり、ひいては害虫密度が低下する。主作物と主作物の畝間、株間を分断するように被覆するリビングマルチでもこの効果があると考えられる。また、より直接的、即時的に、害虫の産卵行動や侵入に対する物理的障壁、または忌避物質を発生するなどの化学的障壁となり、侵入や加害を防ぐことが考えられる。たとえば、モンシロチョウの産卵は、キャベツなど十字架植物の葉裏に行われることが多いが、その葉裏にクローバーなどの植生があれば、産卵行動が物理的に阻害される。そのほか、リビングマルチが地表面を覆うと、地表との視覚コントラストをたよりに作物を探索する昆虫では作物への定位が阻害される。

４．リビングマルチ、カバークロップ栽培が天敵や害虫の密度に与える効果の事例

１）天敵相の増強と害虫密度

シロクローバー、アルファルファやクラクローバーなど豆類牧草をリビングマルチに利用する例は比較的多い。その理由は、緑肥としての効果、地表を被覆する効果が高く抑草効果が期待出来ることである。

大豆栽培にアルファルファをリビングマルチにすると、サシガメ類、ハナアブ類が増え、ダイズアブラムシの密度が低下した（Schmidt et al. 2007)。またトウモロコシやダイズ栽培にアルファルファやクラクローバーをリビングマルチとした場合、オサムシ類の個体数増加が見られ、ヨーロッパアワノメイガの蛹への捕食率が増大したHartwig and Ammon 2002)。また、クローバーをリビングマルチにしてブロッコリーを育てると、クモ類が増え、モンシロチョウ、コナガの被害が減少し、収量も慣行栽培と変わらなかった（Hook and Johnson 2004)。キャベツを、クローバーをリビングマルチに、圃場周辺に障壁作物としてソルゴーを用いて栽培すると、捕食性ゴミムシやクモ類相が増強され、コナガの被害が減少した。キャベツ畑にクローバーをリビングマルチとして栽培すると、モンシロチョウの産卵が減少した（増田、宮田 2008）ナス圃場の畝間にアルファルファとアカクローバーを植え、周囲にソルゴーを障壁作物として配置すると、天敵相が増強され害虫類が減少した（荒川ら 1998）。

（写真２　左　シロクローバをリビングマルチにしたキャベツ栽培、
　　右　大麦をリビングマルチにした大豆栽培）

豆類以外では、北カルフォルニアのリンゴ及びぶどう園で、ライ麦をカバークロップにした場合、天敵のクモ、アリが多くなる一方、害虫であるヨコバイ等が少なくなり、コドリンガの被害も減少し、増収効果が認められた（Minguel et al. 1985)。ハゼリソウ属の*Phacelia tanacetifolia* は、その蜜や花粉でヒラタアブ成虫を誘引する。また、その産卵数が増加することで捕食性である幼虫が多くなり、アブラムシが有意に減少した（Hickman and Wratten 1996）。ダイズに大麦をリビングマルチとして栽培するとジャガイモヒゲナガアブラムシが減少し、天敵相も豊富になった（小野、城所　2007）。

これまでの研究では、リビングマルチやカバークロップの選択や栽培法は、天敵の好みを考慮したものでなく、もっぱら養水分競合等の点から主作物の生育や収量に悪影響が小さなものが選択されている。積極的にリビングマルチやカバークロップを虫害防除に利用しようとするなら、主作物との養分競合だけでなく天敵の選好性も加味した種類の検討が必要となってくる。

２）物理的および化学的障壁効果

リビングマルチがアブラムシなどの害虫の作物への侵入、チョウ類などの産卵・加害行動に対して物理的・化学的障壁となる。

キャベツをシロクローバーをリビングマルチにして栽培すると、キャベツを加害するハエ(cabbage root fly)では産卵行動が阻害され、産卵数が減少した（Brandseater et al.1998、Ryan, et al.1980)。ライグラスをリビングマルチにすると、ジャガイモのアブラムシが減少したが、その理由はリビングマルチがあることによる天敵の捕食効果の増強の他に、作物と裸地とのコントラストが曖昧になり、ジャガイモに定位しにくくなったことが原因と考えられている（Mckinlay 1985）。また、大豆に大麦をリビングマルチとして利用した場合､アブラムシの大豆での個体数が減少し被害が軽減した例(小野､城所　2007)や、茶の周りにペパーミントを植栽するとツマグロアオカスミカメが減少し被害も軽減した例が報告されている（小俣 2007)。これらもリビングマルチによる物理的または化学的な障壁効果によると考えられる。

また、単に害虫の忌避もしくは障壁効果を利用するだけでなく、これと害虫を誘引する

作物と組み合わせ、前者を圃場の中心に、後者を圃場の周編に配置することで、双方の効果を高め、圃場内の作物における害虫の密度を軽減しようとする方法(pull＆push strategy)が、アフリカのトウモロコシの茎に食入する鱗翅目害虫の防除で試みられている。このために効果的な誘引植物（害虫の産卵選好は高いが、幼虫の生育には悪い）と忌避植物を探すためのスクリーニングが 500 種以上の植物で行われ、ネピアグラスとスーダングラスが誘引植物として、molasses glass と silverleaf desmodium が忌避植物として選ばれている(Gurr, et al.2004)。

３）カバークロップの天敵相保全効果

カバークロップでは、ここを越冬場所とするオサムシ類など天敵の生存率を高める効果が期待される。イギリスや米国ではこの目的のため、圃場の周縁部に数メートルの幅でライグラスなどを植え付けたあと不耕起で維持する地帯、ビートルバンク（beetle bank）が普及しつつある。この beetle bank では日平均気温変動幅が、裸地が５℃以上あるのに比べ、１℃から２℃以下であり、２期目の冬のゴミムシやクモ類の平米当たり個体数も、裸地が数十のレベルであるのに対し、300～1400 個体と圧倒的に多くなった（Sotherton 1995）。英国ではこれまで、農地周縁の生け垣(heagelow)が天敵や野生動物の保全帯として機能してきたが、規模拡大を指向した画一的な農場管理がすすみ、生け垣の保全自体が困難になっている。そのため、この生け垣より管理や造成が簡単で、生物の保全機能を有するビートルバンクへの移行を施策として打ち出され、その造成と維持には、政府から奨励金として、２m幅なら、長さ 100m 毎に 12 ポンドが支給される（Macleord et al.2004）。

５．雑草害に対するリビングマルチとカバークロップ利用

麦類やクローバー等を大豆や野菜と同時に植えて生きたマルチとして使ったり、あるいは冬作として栽培した麦類等の全量（茎葉、子実）を次作の大豆栽培でマルチとして使って、雑草を抑制しようとするものである。前者はリビングマルチ栽培、後者はカバークロップ栽培と呼び、作物は不耕起栽培となる。リビングマルチ栽培では東北地域で、秋田県農試を始め多くの研究機関、生産組合などが大豆および麦類の播種様式を中心に試験を行ってきており（井上 ら 2000; 中村 ら 2001; 三浦 ら 2005; 小林 2004）、最近ではこの方法を採用する農家も出てきた。

１）麦類リビングマルチダイズ栽培

ダイズのリビングマルチ栽培は、秋播性の高い麦類を大豆と同時に播種し、生育した麦類を生きたマルチとして雑草防除に利用する技術である。

その特徴として、①．雑草と違い秋まき性の高い麦類は夏には出穂することなく枯れるため、収穫時には作業の邪魔や汚粒の原因にならない点、②．薬剤散布量や防除作業自体の軽減につながる点、があげられる。特に、東北地域においては大豆の生育初期は梅雨の時期にあたるために、茎葉処理剤や中耕培土といった雑草防除のための作業ができない場合があり、これらの作業をリビングマルチの除草効果で代替することは大きなメリットである。このリビングマルチ栽培では、栽培技術の核となる大豆と麦の同時播種機を開発していること（小林ら 2008)、十分な雑草防除効果を得るための麦類の生育目標が播種後 50 日頃の地上部乾物重で 150g/10a である（好野ら 2009）ことを明らかにしており、現在、東

北各地の農家圃場で実証試験を継続中である。

２）麦類カバークロップダイズ栽培

秋に播種した麦類の全量を刈り敷いてマルチとし、そこに大豆を不耕起播種する栽培技術である。この麦類の刈り敷きマルチが雑草の出芽を抑制する（Kobayashi. et al. 2004)。その麦の刈り敷量の目安は、麦類の地上部が 1t/10a を超えることで、その場合、出芽抑制はほぼ完全になることを明らかにしている(小林ら 2007)。さらにマルチが抑制しきれず出芽した場合でも、生育が先行している大豆の被蔭によって、雑草の実生は生育が強く抑制されて枯死に至る。この技術の特長は、雑草防除以外にも、大豆の増収(小林ら　2007)、地力維持、休閑期の管理など多面的な効果が期待できることにある。この大豆の増収は雑草害の回避のみならず、麦残さを介した窒素養分供給の最適化、根粒菌や菌根形成促進などにもよると考えられる（島崎ら 2008）。また、麦類の持ち出しがなく有機物が徐々に蓄積するため、地球温暖化防止対策としての炭素貯留源として利用可能性が確認されつつある。麦類リビングマルチ及びカバークロップ大豆栽培の特徴と問題点を以下に示す。

	リビングマルチ	カバークロップ
技術の特徴	・麦をダイズと同時に播く。既存体系に組み込みやすい	・麦を冬に播く（休閑期の有効活用）
ねらい	・雑草防除、省力（無中耕無培土）	・　ダイズは不耕起播種 雑草防除、地力維持、増収
抑草効果のある雑草	・一年生夏雑草	・一年生夏雑草、冬雑草
抑草メカニズム	・出芽後の生育抑制	・出芽抑制、用植物の生育抑制
大豆の収量	・慣行と同程度～やや減収	・増収傾向
問題点と対策	・麦類との競合による減収 ・品種選定、肥培管理法改良	・苗立ち不安定 ・安定した不耕起播種機の開発

６．研究の現状と技術化に向けて必要な研究

これまでの研究ではリビングマルチやカバークロップが、天敵相の増強を促進し害虫密度抑制に関係したり、害虫の作物への侵入を阻害すると示唆されるデータが、事例的に報告されている。しかし、これらのメカニズムの解明や、さらに誘引された天敵がどの程度害虫を捕食､寄生し個体数抑制に寄与しているのかについての評価は殆ど行われていない。リビングマルチやカバークロップを利用した害虫制御法の開発およびその適応範囲の選定や安定化においては、これらのメカニズムや評価を明らかにしておくことが重要である。天敵を誘引する植物については、近年、国内でも研究がおこなわれつつあるが、天敵の誘引と定着に有効な植物がさらに多く提示され、リビングマルチにおいて利用可能な選択肢が拡大することを期待したい。また、天敵ばかりでなくヨトウムシなどの害虫も寄せる可能性がある点も注意が必要であり、主作物の害虫を誘引しないような組み合わせの検討が

必要である（Gurr et al.2004）。

リビングマルチやカバークロップで虫害抑制効果が見られた場合でも、その多くは虫害の被害許容水準をクリアする充分なものではなく、他の防除手段との併用が必要である。具体的には、天敵昆虫に影響の少ない防除薬剤などの資材や作物周辺における障壁作物やおとり、誘引植物等の植生利用が有望である。またこれらの効果は個別で行うより組み合わせることでさらに高まる。このため圃場全体における効率的、有機的な植生配置の構築と管理に関する研究（Habitat manipulation）が、リビングマルチやカバークロップを利用した環境保全的害虫管理には必要である。

雑草害の抑制効果についても、その効果の安定化が大きな課題であり、どのような条件でこの技術が適用できるかを明らかにする必要がある。具体的には、麦類・大豆と雑草の競合様式の解明や、地域の土壌や気象条件ごとに適切な品種や栽培条件を選定できるように麦類の生態的特性と大豆の生育や抑草効果の関係の解析が重要で、現在、カバークロップ研究チームでこれらの研究を進めている。また、リビングマルチに用いる麦類は、六条オオムギが最適なことが多いが（三浦、小林 2008)、オオムギの生産は限られており、子実の入手が困難な場合もある。このため、実用的な観点から、コムギなど他の種、品種での代替が可能かどうかの検討も行っている。

リビングマルチ栽培では主作物の生育時期が同じであるため、栄養競合、光競合が不可避であり、虫害や雑草害軽減効果が得られたとしても多くの作物との組み合わせで減収が見られる。施肥法の改良や適切な栄養競合が少ないリビングマルチと作物組み合わせの選定が必要である。カバークロップ栽培は、作物との養分、光等を巡る競合がないことから収量減の恐れが小さく、さらに多量の有機物の還元や土作りにも貢献できるところなど、今後の環境保全的農業に貢献しうる可能性は大きい。

引用文献

1) 赤池一彦、平林正光、窪田哲(2004)高冷地におけるキャベツの有機栽培－障壁作物と被覆作物の利用がコナガ、ダイコンアブラムシの発生と収量に及ぼす影響－山梨県総合農業試験場研究報告 14、1-9.

2) 荒川浩美、合田健二、宮睦子 (1998)天敵昆虫温存によるナスの害虫防除. 関東病虫研報.45:191-193.

3) Brandseater LO, Netland J and Meadow R (1998) Yields, weeds, pests and soil nitrogen in a white cabbage living mulch system, Biological Agriculture and Horticulture 16, 291-309.

4) Gurr GM, Wratten SD and Altieri MA (2004)Ecological engineering for pest management, CSIRO Publishing, Australia, pp232.

5) Hartwig NL & Ammon HU (2002) Cover crops and living mulches, Weed Science 50, 688-699.

6) Hickman JM & Wratten SD (1996) Use of Phacelia tanacetifolia Strips to enhance biological control of aphids by hoverfry larvae in cereal fields, Journal of Economic Entomology 89(4), 832-840.

7) Hook CR & Johnson MW (2004) Using undersown clovers as libving mulches:effect

on yields, lepidopterous pest infections, and spider densities in a Hawaiian broccoli agroecosystem International. Journal of Pest Management 50(2), 115-120.
8)井上一博・宮川英雄・佐々木和則 2000. 大麦のマルチ効果を利用した大豆の省力栽培法. 東北農業研究 53、 103-104.
9)小林浩幸 2004 ダイズ栽培におけるリビングマルチとカバークロップを中心とした省除草剤雑草管理技術の研究動向. 東北の雑草 4、 1-7.
10) 小林浩幸・内田智子・島崎由美 2007. 前作大麦のカバークロップ効果で大豆が増収. 農業および園芸 82、 1267-127.
11)小林浩幸・宍戸力雄・櫻井貴雄・好野奈美子・内田智子・島崎由美・山下伸夫・酒井真次・坂上修・小柳敦史.2008 ムギ類をリビングマルチとして利用するダイズ栽培のためのムギ類・ダイズ同時播種機. 雑草研究 53、 63-68.
12) Kobayashi H, Miura S and Oyanagi A. (2004). Effects of winter barley as a cover crop on the weed begetation in a no-tillage soybean. Weed Biology and Management 4, 195-205.
13) Kohno K, Takeda M and Hamamura T (2007) Insecticide susceptibility of a generalist predator *Labidura riparia*(Dermaptera:Labiduridae), Appl.Entomol. Zool.42(3), 501-505.
14) Macleord A, Wratten S.D, Sotherton N.W and Thomas M.B.(2004) Beetle banks asrefuges for beneficial arthropods in farmland:long term changes in predator communities and habitat, Agriculture and Forest Entomology, 6, 147-154.
15)増田俊雄・宮田将秀 2008 被覆植物の混植によるキャベツ害虫の密度抑制効果 北日本病虫研報 59:153-157.
16) Mckinlay RG (1985)Effect of undersowing potatoes with grass on potato aphid numbers, Ann.Appl.Biol.106, 23-29.
17) Minguel A, Altieri MA and Schmidt LL (1985)Cover crop manipulation in northern Calofornia orchards and vineyards:Effects on arthropod communities, Biological Agriculture and Horticulture (3), 1-24.
18)三浦重典・小林浩幸・小柳敦史 2005. 東北地域における秋播き性オオムギを利用したダイズのリビングマルチ栽培. 日本作物學會紀事 74 (4)、 410-416.
19)三浦重典・小林浩幸 2008. ダイズのリビングマルチ栽培に利用するムギ類の品種と雑草抑制効果との関係. 農作業研究 43、 207-212.
20) 永井一哉 (1993)ミナミキイロアザミウマ個体群の総合的管理に関する研究.岡山県農試臨時報告 82, 1-55.
21) Nakamoto T and sukamoto MT (2006) Abundance and activity of soil organisms in fields of maize grown with a white clover living mulch, Agriculture Ecosys temand Environment 115, 34-42.
22)中村英明・川村寿幸・岩渕政博 2002. 秋播き性コムギを用いた大豆の雑草防除法. 雑草研究 46 (4), 291-295.
23) 根本久 編(2003)天敵利用で農薬半減 作物別防除の実際.農文協.東京 198p.
24) 小俣良介 (2007)ペパーミントによるチャのツマグロアオカスミカメ被害抑制、農業および園芸.82(6):677-682.

25）小野亨・城所隆（2007）大豆のジャガイモヒゲナガアブラムシに対するムギ類リビングマルチのバンカープラントとしての利用、北日本病虫研報.58、99-105.
26)大野和朗 2007 地域天敵資源を活用した生物的防除.今月の農業.3 月号:30-33.
27）Ryan J, Ryan MF and McNaeidhe F (1980) The effects of interrow plant cover on population of the cabbage root fly, *Delia brassicae*(Wiedemann), Journal of Applied Ecology 17, 31-40.
28）Schmidt NP , O'enal ME and Singer JW (2007)Alfalfa living mulch advances biological control of soybean aphid Environmental, Entomology 36(2), 416-424.
29)島崎由美・内田智子・小林浩幸 2008. カバークロップに用いた冬作オオムギが不耕起栽培ダイズの菌根形成に与える影響. 日本作物学会紀事 77、 395-402.
30）Sotherton NW (1995) Beetle banks -Helping nature to control pests, Pesticide Outlook, December 13-17.
31）山下伸夫（2008）アザディラクチンを主成分とするニーム資材の抗害虫効果と天敵等への影響、今月の農業５月号、72-77.
32）好野奈美子・小林浩幸・内田智子・島崎由美 2009. ムギ類をリビングマルチとして用いたダイズ栽培におけるダイズ-ムギ類-雑草の群落空間構造. 雑草研究 54、139-146.

土壌消毒をめぐる最近の話題
－生物機能を利用した土壌消毒を中心に－

千葉県農林総合研究センター
病害虫防除課　　植松清次

はじめに

わが国では、連作に伴って発生する土壌病害虫を防除するため、臭化メチルやクロルピクリン等による土壌くん蒸消毒が広く普及した。特に、臭化メチル剤は、トマト、メロン、キュウリ等の施設園芸における集約的生産体系を支えてきた。しかし、臭化メチルは 1992 年第 4 回モントリオール議定書締約国会合において、オゾン層破壊物質として指定され、1997 年の第 9 回モントリオール議定書締約国会合において、代替不可能な一部の用途（不可欠用途）を除いて 2005 年に使用が禁止された（表 1、表 2）。2008 年になり、わが国は UNEP（国連環境計画）の下部機関である TEAP（技術・経済評価委員会）、 MBTOC（Methyl Bromide Technical Options Committee：臭化メチル技術選択肢委員会）に対し、「臭化メチルの不可欠用途全廃のための国家管理戦略」を提示し、2013 年に不可欠用途用臭化メチルを全廃するとになった。

現在、代替技術としてヨウ化メチル等の代替薬剤の開発、クロルピクリンのフロー剤化（化学的防除）、太陽熱や熱水、蒸気による消毒（物理的防除）、生物農薬や拮抗微生物の探索・導入（生物的防除）、病害性抵抗性品種、抵抗性台木の導入、完熟堆肥の施用、菌根菌の接種および輪作（耕種的防除）の単用あるいは組み合わせなどの開発と普及が進められている（西，2006）。しかし、これらの代替技術は臭化メチルに比較して十分な消毒効果が得られているとは限らない。クロルピクリン剤は代替剤と広く普及しているが、刺激臭が強いため使用者への危害や、混住地帯での土壌消毒でしばしばトラブルとなっており、使用がかなり制限されている。

近年、代替技術としてバイオフューミゲーションや生物的土壌消毒、土壌還元消毒等の生物機能を利用した土壌消毒が研究が盛んに行われ、普及技術となったものもある。ここでは、こうした取り組みを中心に紹介する。

１．臭化メチル代替化学農薬

MBTOC で話題となった臭化メチル代替化学農薬は下記のとおりである(田代, 2006；西, 2006)。

(１) クロルピクリン：有力な臭化メチル代替剤である。フロー剤はイタリア、米国、日本で登録がある。米国などでは広範囲の圃場で処理する場合、地域住民や環境に対する影響評価が話題となっている。

(２) ホスチアゼート：センチュウ類や土壌害虫に有効である。

(３) シアン：オーストラリアでイチゴやニンジンの糸状菌病や雑草に対する代替技術として評価されている。

(４) Dazitol：米国で登録されているが試験例は少ない。トウガラシから抽出したキャプサ

イシンとカラシナ種子から抽出したアリルイソチオシアネートが主成分である。トマト、キュウリ、メロンやシバの土壌病害虫に有効との試験例あり。代替剤としての評価のためには、より多くの試験例が必要である。

(５) D-D ＋クロルピクリン：オーストラリアやスペインではイチゴで利用。フロー剤が米国で登録されている。米国などでは広範囲の圃場で処理する場合、地域住民や環境に対する影響評価が話題となっている。

(６) カーバム・ダゾメット(MITC とその関連剤)：土壌病原菌と雑草の双方に効果があるが、効果の安定性確保のための処理方法の改善が必要である。他剤との組み合わせ処理技術の開発が進んでいる。

(７) ヨウ化メチル：臭化メチルと同様の効果を示す。オゾン層破壊に及ぼす影響は、非常に低い。日本ではまもなく登録の予定である。

(８) ジメチルジスルフィド：フランスやイタリアで検討が進む。糸状菌や線虫に効果があるが、臭メチル代替剤としての評価にはさらなる検討が必要とされている。

(９) プロピレンオキサイド：病原菌や雑草に効果。さらなる検討が必要であるという。

(10) アジ化ナトリウム：米国で検討が進む。糸状菌、線虫、雑草に有効。ハマスゲの一種(Nutsedge) やネグサレセンチュウに対する効果は不十分である。

(11) スルフリルフロライド：土壌病原菌や線虫に対する効果を確認。さらなる検討が必要であるという。

２．農薬に依存しない代替技術

MBTOC で話題となった化学農薬以外の代替技術は以下のとおりである（西, 2006）

(１) 熱水土壌消毒・蒸気消毒：蒸気消毒はオランダの花き栽培では約 50%が利用しているという。日本では、温室メロンやカーネーション栽培などで古くから普及している。近年オランダとイスラエルで 800 ℃以上の熱風を用いて土壌消毒を行う機械が開発された。この機械は 250m の長さの畦を 1 時間で処理する能力を持つという。熱水土壌消毒は日本で開発され、普及が始まっている(Kita, et al. 2003 ; Uematsu, S. et al. 2003 ; 北, 2006) 。

(２) 太陽熱土壌消毒：イスラエルの Katan ら(1976)や奈良県の児玉ら(1978)によって開発された技術である。夏季高温になるような気候と栽培条件に恵まれた国々で、その利用が拡大しつつある。カーバムナトリウム塩と併用すると、その効果はより安定するという。近年アメリカでは、育苗用土の消毒に太陽熱を利用するシステムを開発しているという。

(３) バイフューミゲイション：単独では十分な効果は出ないが、薬剤と併用することにより、必要な薬量の削減が可能という。本法では、植物の分解過程で生ずる揮発性物質あるいは根から直接分泌される揮発性物質を利用する。土壌病害、害虫、線虫防除に効果がある(後述)。

(４) 生物防除：海外では *Trichoderma* 属菌を土壌処理する方法が実用化されている。日本でもトリコデルマアトロビリデ水和剤(エコホープ)、アグロバクテリウムラジオバクター剤(バクテローズ)、非病原性エルビニアカルトボーラ水和剤(バイオキーパー水和剤)、シュードモナスフルオレッセンス剤(セル苗元気)、非病原性フザリウムオキシス

ポラム水和剤(マルカライト)などが開発されている。

(５) 少量培地：施設栽培で普及が始まっている。初期投資が必要である。少量土壌の消毒には蒸気消毒が対応可能である。

(６) 接ぎ木(抵抗性台木)：世界各地で普及が始まっている。米国では接ぎ木技術の開発が始まっている。

(７) 抵抗性品種：世界各地で採用されている。特にトマトとメロン、トウガラシ類で抵抗性品種の開発例が多い。

３．生物機能を利用した土壌消毒（Soil disinfestation and remediation with microbial function）

竹原(2008)は、(狭義の)生物的土壌消毒法(Biological Soil Disinfestation ; Blok ら, 2000 ; Goud ら, 2004)やバイオフュミゲーション、還元土壌消毒、嫌気的土壌消毒等の生物的プロセスを含む作用機構によって、作物栽培前に土壌病原菌の密度や活性を低下させる手法を（広義の）「生物的土壌消毒法」と呼び、熱などによる物理的土壌消毒や化学的土壌消毒に対する土壌消毒法である。しかし、この呼び方は、Blok らの(狭義の)生物的土壌消毒法と紛らわしいので、ここでは「生物機能を利用した土壌消毒」と呼称することにしたい。

(１) バイオフューミゲーション　Biofumigation

アブラナ科植物を土壌に鋤き込むと、後作の土壌病害が軽減される現象が古くから知られている(國安, 1989)。近年、この方法はオーストラリア連邦科学産業研究機構(Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation)の J. A. Kirkegaard らによって、バイオフューミゲーション(Biofumigation：生物的くん蒸)と呼ばれるようになった(Kirkegaard and Sarwar, 1998 ; Sarwar and Kirkegaard, 1998 ; Morra and Kirkegaard, 2002)。カラシナなどアブラナ科植物に含まれるグルコシノレート(カラシ油配糖体の一種)が土壌中で分解されて生じるアリルイソチオシアネート(AITC)などのイソチオシアネート類(揮発性抗菌物質)とその他の硫黄関連化合物が、土壌中の病原菌の密度低下や活性低下に関与していると考えられている(Brown and Morra, 1997)。

竹原ら(1996 ; 2004 ; 2007)は、コマツナなどのアブラナ科植物を鋤き込むことにより、後作のハクサイ黄化病、ホウレンソウ萎凋病などの土壌病害が軽減される現象を認めている。

(２) Blok らの狭義の Biological Soil Disinfestation (BSD)

オランダ ワーゲニンゲン大学の Blok らは、牧草などの新鮮有機物(4 ～ 5t/ha)を鋤き込んで潅水を行い、気密性の高いシートで被覆し還元状態にする土壌消毒法を開発した(Blok et al., 2000 ; Goud et al., 2004)。この方法は、(1)比較的低温条件で行える、(2) 7 ～ 10 月(3 ～ 4 か月間)と長期間処理する、(3)50 ～ 70mm 程度の潅水量で、それほど多くない、(3)気密性のシートで酸素の流入を防ぐことによって還元状態を維持するなどが、後述する土壌還元消毒と異なる。

(３) 土壌還元消毒 (還元土壌消毒、Reductive Soil Disinfestation)

Okazaki(1985)は、3%ショ糖液 1ml を 1g の土壌と混和し 28 ℃下に置くと、酸化還元電位が著しく低下し、ダイコン萎黄病菌の密度を低下させることをみいだした。新村らは、フスマなどの比較的分解しやすい有機物を用いた土壌還元消毒(RSD) を開発した(新村

ら, 1999；新村, 2000；2004)。この方法は、土壌にフスマや糖蜜等の易分解性有機物を混和し、圃場容水量以上に潅水後、土壌表面を透明フイルムで約 1 か月被覆することにより、土壌を強制的に還元状態とするものである。太陽熱消毒は約 2 か月夏季にハウスを密閉し、地温をできるだけ 40 ℃以上にするのが好ましいが、本法では 35 ℃程度の温度で約 1 か月で土壌病原菌を死滅させることを明らかにした。わが国で多くの土壌病害に対し適用が試みられ、各地で普及が始まっている(竹内, 2004；渡辺・田畑, 2004；牛尾ら, 2004；片瀬ら, 2002；渡辺, 2006；久保・片瀬, 2007)。還元状態で土壌中では酢酸や酪酸などが生成され、これら抗菌性物質により病原菌密度の低下やセンチュウ類の死滅を引き起こしていると考えられている(Okazaki and Nose, 1986；片瀬ら, 2002；久保ら, 2005；久保・片瀬, 2007；Momma et al., 2006；Momma, 2008)。また、クロストリジウム(*Clostridium*)属菌が関与しているとの指摘もあり(門馬ら, 2007；Momma, 2008)、未解明部分が多い。

なお、Shennan ら(2007)は、RSD と BSD は嫌気的条件下で行われる土壌消毒なので、一括して anaerobic soil disinfestation(ASD；嫌気的土壌消毒)と呼称することを提案をしている。

(４) 低濃度エタノール土壌消毒

低濃度エタノールを用いた土壌消毒技術は、エチルアルコール(エタノール)を水で 1v/v %程度に薄めて、灌水装置により畑土壌が湛水状態になるまで処理した後、農業用ポリエチレンフィルム(農ポリ)で土壌表面を 2 ～ 3 週間程度被覆するという低コストで簡便な技術である。処理方法は、液肥混入器と潅水チューブを利用して、水とエタノールを混合しながら処理可能である。処理中には 30 ～ 35 ℃の温度が必要であるが、さらに高温域で防除効果が高まる。

この方法により、ホウレンソウ萎凋病、サツマイモネコブセンチュウなどの土壌病害虫や雑草に、十分な防除効果が得られている(植松, 2007；Uematsu, 2007)。

土壌還元消毒では、フスマを処理した土壌層では防除効果が優れ、フスマが鍬込まれない下層では効果が低下することが知られているが、エタノールの場合は、深層に分布する土壌病害虫に有効であることが期待できる。

本技術を適用することで、(1)土壌中の環境が酸化(好気的)状態から還元(嫌気的)状態に変化すること、(2)酢酸などの有機酸濃度が増加することなどが要因として考えられる(Kobara et. al, 2007；2008；小原ら, 2008)。いずれにせよ、詳細な生物機能的メカニズムの解明が今後必要であり、その知見に基づいた土壌消毒法の確立が必要である。

原料アルコール(約 90v/v%)は、米国、ブラジル、タイ、インドネシア、中国等から、年間約 360 千 kL が輸入され、価格は 50 ～ 60 円/L である。この原料アルコールを使用した場合に、1v/v%エタノールを 100L/m^2 の処理量で処理すると仮定した場合に、エタノール資材の費用は、約 60,000 円/10a である。

(５) その他の事例

湛水もしくは田畑輪換による病害虫防除の試みが古くから行われている。こうした防除効果は、湛水条件下で、土壌微生物によって惹起される土壌の低酸素化や還元化が関与していると考えられる。Stover ら(1953，1954，1956)は，*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* により引起こされるバナナのパナマ病を湛水によりほぼ完全に防除できることを示した。また，ダイズ紫斑病（豊川ら，1966），ダイズ白絹病（仲川，1999），コムギ立枯病（埼玉

県農業試験場, 1968)，コンニャク白絹病（牧島, 1974)、ジャガイモそうか病(仲川ら, 2006)、イチゴ萎凋病(Ebihara ら， 2009)などは田畑輪換により発生が軽減することが知られ，各種土壌伝染性病害の対策に用いられている。

不熟有機物や植物残さを鍬込んで防除する試みもある。ダイズ白絹病やジャガイモそうか病(仲川ら，1999，2006)、ナス青枯病(峰村・野村，2004))などでは、湛水と有機物との組み合わせで防除効果が認められている。1/10,000a ワグネルポットに米ぬか 3t/10a に水 50ml を土壌混和処理し、25 ℃下でサツマイモネコブセンチュウが低下する(田場・諸見, 2007)。ダイコンバーティシリウム黒点病では、マリーゴールド(堀田， 2008)やアメリカフウロ(大城, 2008)、エンバク野生種(*Avena strigosa*)(小松・山下, 2008)の鍬込みで微小菌核の密度低下が認められている。

太陽熱土壌消毒を行う際に、稲わらなどの不熟有機物を土壌に混和すると、殺菌効果が高まることが知られている(児玉ら， 1978)。また、ダイコン萎黄病の罹病残さの滅菌するために、残さをビニール袋に入れ密封して、陽光下に放置して、嫌気的発酵させると、萎黄病菌(*F. oxysporum* f sp. *raphani*)が不活化することを見出し、さらに、残さ中に生成される酢酸等の抗菌性物質の関与を示唆した(萩原・国安, 1988 ; 萩原・竹内, 1982 ; 萩原・竹内, 1993 ; 萩原ら, 1984)。

４．おわりに

バイオフューミゲーションは鍬込んだ植物体から発生する揮発性抗菌物質を利用することによって、また、その他の方法では、土壌中へ有機物を施用することで生じる生物的プロセスを利用することによって土壌消毒を行う技術である。これらの技術は、環境への負荷が小さく、安全性の高い技術であると考えられる。しかし、生物機能を利用する技術であるので、防除効果を高めるには、検討しなければならないことが多く残されている。例えば、防除効果に関与する微生物の特定、地域や季節、土壌の違いで防除効果に差があるか、被覆資材、処理する量、処理量の至適化、処理方法の検討、防除・作用機構の解明、適用できる作物と病害虫とその効果の確認と実証、土壌消毒から収穫まで、さらに次作への効果の持続性の評価、薬害の確認等、実用化までに多くの課題が残されている。

最後に、本文を作成に当たり、西 和文および竹原利明両博士に資料提供や指導・協力をいただいた。ここに深く感謝申し上げる。

５．主な参考文献

Blok, W. J., Lamers, J. G., Termorshuizen, A. J. and Bollen, G. J. (2000). Control of soilborne plant pathogens by incorporating fresh organic amendments followed by tarping. Phytopathlogy 90:253-259.

Brown, P. D. and Morra, M. J. (l997). Control of soil-borne plant pests using glucosinolate-containing plants. Advances in Agronomy 6l:167-23 1.

藤井義晴 (2003). ヘアリーベッチの他感作用と農業への利用および作用成分シアナミドの発見.農業および園芸 78(9):14 － 22.

Goud, J. C., Termorshuizen. A. J., Blok, W. J., and van Bruggen, A. H. C. (2004). Long-term effect of biological soil disinfestation on Verticillium wilt. Plant Dis. 88:688-694.

萩原　廣・竹内昭士郎 (1982). 確病残さの好気的または嫌気的発酵処理によるダイコン萎黄病菌の不活化. 日植病報 48:688-690.

堀田光生 (2008). マリーゴールドを利用した青枯病の防除. 日植病報 62:87-89.

Katan, J., Greenberger, A., Alon, H., and A. Grinstein. 1976. Solar heating by polyethylene mulching for the control of disease caused by soilborne pathogens. Phytopathology 66: 683-688.

片瀬雅彦・久保周子・牛尾進吾・大塚英一・山本二美（2002）. フスマを用いた土壌還元消毒によるネコブセンチュウの防除. 応動昆大会講要. 46:33

Kirkegaard, J. A. and Sarwar, W, M. (199S). Biofumigation potential of brassicas. 1. Variation in glucosinolate profiles of diverse field-grown brassicas. Plant and Soil 201:71-89.

北 宜裕 (2006). 物理的消毒法の効果と普及. 野菜茶業研究集報 3:7-16.

Kobara, Y., Uematsu, S., Tanaka-Miwa, C., Sato, R. and Sato. M. (2007). Possibilty of the new soil fumigation technique with ethanol solution. Proceedings of 2007 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions:74.1-74.2

小原裕三・植松清次･田中千華・佐藤理恵子・佐藤充克. (2008). 低濃度エタノールを用いた新規土壌消毒法の開発. 農林水産技術研究ジャーナル 31(3):15-20.

小松　勉・山下　茂 (2008). 緑肥作付けによるダイコンバーティシリウム黒点病の抑制効果. 平成 21 年日植病大会講要予稿集:6l.

久保周子・牛尾進吾・片瀬雅彦・竹内妙子（2005）. 土壌還元消毒効果に関与する要因の解析. 71:281-282

久保周子・片瀬雅彦 (2007). 土壌遭元消毒の効果と普及. 植物防疫 61:68-72.

國安克人 (1989). アブラナ科作物青刈栽培による土壌病害防除. 農業および園芸 64:955-959.

草川知行・平舘俊太郎・藤井義晴・高崎 強 (2000). カラシナ(*Brassica juncea* Cross.)由来の揮発性物質による雑草の発芽抑制. 千葉農試研報 41:29-34.

Mayton, H.S., Olivier, C., Vaughn, S. F. and Loria, R. (1996). Correlation of fungicidal activity of *Brassica* species with allyl isothiocyanate production in macerated leaf tissue. Phytopathology 86: 267-277.

峯村　晃・野村康弘 (2004). 湛水還元処理によるナス青枯病および雑草への影響. 関西病虫研報 46:61-62.

Momma, N. (2008). Biological soil disinfestation (BSD) of soilborne pathogens and its possible mechanisms. JARQ 42:7-12.

Morra, M. J. and Kirkegaard, J. A. (2002). Isothiocyanate release from soil-incorporated *Brassica* tissues. Soil Biol. Biochem. 34:1683-1690.

仲川晃生(1999). ダイズ白絹病の湛水による防除. 今月の農業 3 月号:96-98..

仲川晃生・中村吉秀・菅　康弘・迎田幸博 (2006). 土壌の湛水化がジャガイモそうか病の発生に及ぼす影響.関東東山病虫研報 9:23-28.

西　和文 (2006). 臭化メチルを巡る国際動向と代替技術. 野菜茶業研究集報 3:35-42.

Okazaki, H. (1985). Volatile(s) from glucose-amended flooded soil influencing survival of *Fusarium oxusporum* f. sp. *raphani*. Ann. Phytopathol. Soc. Jpn. 51:264-271.

Okazaki, H. and Nose, K. (1986). Acetic acid and n-butyric acid as causal agents of fungicidal activity of gJucose-amended flooded soil. Ann. Phytopathol. Sac. Jpn. 52:384-393.

大城　篤 (2008). アメリカフウロを利用した青枯病の防除. 植物防疫 62:90-95.

Sarwar, M., and Kirkegaard, J. A. (1998). Biofumigation potential of brassicas. II. Effect of environment and ontogeny on glucosinolate production and implications for screening. Plant and soil. 201:91-101.

佐藤紀男 (2006). 米糠、菜種油粕の表面散布による除草を行ったときの水田土壌の変化. 平成 17 年度研究成果情報(東北農業):43-44.

Shennan, C., Muramoto, J., Bolda, M., Koike, S. T., Daugovish, 0., Rosskopf, E., Kokalis-Burelle, N. and Klonsky, K. (2007). Optimizing anaerobic soil disinfestation : an alternative to soil fumigation? Proceedings of 2007 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions : 40. 1-40.4.

新村昭憲・坂本宣崇・阿部秀夫 (1999). 還元消毒法によるネギ萎凋病の防除. 日植病報 65:352 (講要).

新村昭憲 (2004). 還元消毒法の原理と効果. 土壌伝染病談話会レポート 22:2-12.

田場　聡・諸見里善 (2007). 沖縄に分布する３種土壌におけるサツマイモネコブセンチュウおよび土壌微生物相に及ぼす米ぬか混和の影響. 沖縄農業第 40(1):59-67

Takehara, T., Hanzawa, S., Funabara, M., Nakaho, K. and Nakagawa, A. (2004). Control of soilborne pathogens using allelopathic plants to lower redox potential of soil. Phytopathology. 94:S101.

竹原利明・井上博喜・宮川久義 (2007). カラシナを用いた還元土壌消毒によるトマト萎凋病の防除.日植病報 73:63-64. (講要)

竹原利明 (2008). 生物的土壌消毒による土壌病害の防除. 土壌伝染病談話会レポート No.24:70-81.

武地誠一・菅野義忠 (1995). メチオニンによるダイコン萎黄病の発病抑制効果とその作用機作. 平成 6 年度研究成果情報(東北農業):133-134.

竹内妙子 (2004). 千葉県における土壌還元消毒法による土壌病害防除. 土壌伝染病談話会レポート 22:13-21.

田代定良 (2006). 臭化メチル代替農薬の効果と普及. 野菜茶業研究集報 3:21-28.

Uematsu, S., Nishi, K. and Kita, N.（2003）. Hot water soil sterilization begins in Japan. Farming Japan 37:35-41.

Uematsu, S., Tanaka-Miwa, C., Sato, R., Kobara, Y. and Sato, M. (2007). Ethyl alcohol as a promising material of reductive soil disinfestation for controlling root knot nematode and soilborne plant diseases. Proceedings of 2007 Annual International Research Conference on Methyl Bromide Alternatives and Emissions Reductions : 75.1-75.3

植松清次・田中千華・佐藤理恵子・小原裕三・佐藤充克 (2008). エタノールを用いた土壌還元消毒. 日植病報 74:180 (講要).

渡辺秀樹 (2006). 岐阜県における代替技術普及の取り組み～夏秋トマト栽培における土壌還元消毒法の普及事例～. 野菜茶業研究集報 3:43-48.

土壌伝染性ウイルス病の特徴と防除対策

中央農業総合研究センター
昆虫等媒介病害研究チーム
津 田 新 哉

キーワード：土壌伝染・ウイルス・臭化メチル・ピーマン

１　はじめに

我が国における野菜生産では，同一作物の周年栽培，栽培様式の多様化等により多種多様な病害虫が常時発生している．そのような状況の中で，それら病害虫の発生を制御するために，規定の範囲内とはいえ，栽培期間中に多種類の化学農薬が多数回散布され，環境への負荷あるいは食品の安全性が危惧されている．我が国で生産される生鮮野菜を海外からの輸入品に負けないものとして維持発展させていくためには，安全・安心で新鮮な生産物を消費者に提供していく必要がある．そのためには，化学農薬への過度の依存から脱却した環境保全型病害虫防除技術の開発が極めて重要である．

栽培圃場において常時発生している病害虫，とりわけ土壌伝染性ウイルス病を制御するためには，土壌くん蒸剤の一種，臭化メチル剤による土壌消毒が最も効果的であり，その適用範囲の広さと効果の安定性，さらに作業性の良さなどの観点から農業現場の末端まで広く普及してきた．しかし本剤は，1992 年のモントリオール議定書締約国会合により，オゾン層を破壊する物質として指定され，2005 年には不可欠用途（特例措置）や検疫用途等を除き先進国では撤廃された．我が国では，本剤は野菜（キュウリ，メロン，スイカ，ピーマン，シシトウ）生産で発生する特定の土壌伝染性ウイルス病害対策に必要不可欠であるとし，地方自治体の申請に基づき国際審査の決議を経て継続的に利用している．しかし，本薬剤は，国際連合との協議において，2013 年以降，我が国からは完全に姿を消すことが決定されている．それ以降の本剤に代わる土壌伝染性ウイルス病害防除技術，とりわけ環境保全型の防除技術体系の開発は喫緊の課題となっている．

２　土壌伝染性ウイルス病

我が国の野菜生産圃場における主要な土壌伝染性ウイルス病は，施設野菜生産ではトウガラシ・ピーマン（シシトウを含む）でのトウガラシマイルドモットルウイルス（PMMoV）によるモザイク病，キュウリ，メロン，スイカなどのウリ科で発生するキュウリ緑斑モザ

イクウイルス（CGMMV）による緑斑モザイク病やメロンえそ斑点ウイルス（MNSV）によるえそ斑点病などが挙げられる．また，露地野菜生産では，レタスでのミラフィオリレタスビッグベインウイルス (MLBVV), レタスビッグベイン随伴ウイルス (LBVaV), 野菜ではないがテンサイでのビートえそ性葉脈黄化ウイルス (BNYVV)が挙げられ, チューリップで甚大な被害を与えているチューリップ微斑モザイクウイルス (TMMMV)やチューリップ条斑ウイルス (TuSV)も土壌伝染性であり，甚大な経済的被害を発生させている（表１）．

表1 我が国の主な土壌伝染性植物ウイルス一覧

ウイルス属名	ウイルス種名a)（略称）	媒介方法
Tobamovirus	タバコモザイクウイルス（TMV）	接触伝搬
	トマトモザイクウイルス（ToMV）	接触伝搬
	トウガラシマイルドモットルウイルス（PMMoV）	接触伝搬
	キュウリ緑斑モザイクウイルス （CGMMV）	接触伝搬
Carmovirus	メロンえそ斑点ウイルス（MNSV）	土壌菌伝搬
Carmovirus	エンドウ茎えそウイルス（PSNV）	土壌菌伝搬
Necrovirus	トルコギキョウえそウイルス（LNV）	土壌菌伝搬
Necrovirus	タバコネクロシスウイルス（TNV）	土壌菌伝搬
Ophiovirus	ミラフィオリレタスビッグベインウイルス（MLBVV）	土壌菌伝搬
	チューリップ微斑モザイクウイルス（TMMMV）	土壌菌伝搬
	Lettuce ring necrosis virus（LRNV）	土壌菌伝搬
所属未定	チューリップ条斑ウイルス（TuSV）	土壌菌伝搬
Varicosavirus	レタスビッグベイン随伴ウイルス（LBVaV）（タバコ矮化ウイルス）	土壌菌伝搬
Bymovirus	オオムギマイルドモザイクウイルス（BaMMV）	土壌菌伝搬
	オオムギ縞萎縮ウイルス（BaYMV）	土壌菌伝搬
	イネえそモザイクウイルス（RNMV）	土壌菌伝搬
	コムギ縞萎縮ウイルス（WYMV）	土壌菌伝搬
Furovirus	ムギ類萎縮ウイルス（SBWMV）	土壌菌伝搬
Benyvirus	ビートえそ性葉脈黄化ウイルス（BNYVV）	土壌菌伝搬
	Beat soil-borne mosaic virus（BSBMV）	土壌菌伝搬
Pomovirus	ジャガイモモップトップウイルス（PMTV）	土壌菌伝搬

a)ウイルス名が日本語は我が国で発生しているもの

タバコモザイクウイルス（TMV）と同属の PMMoV および CGMMV による土壌伝染は，苗を本圃に定植する際に発生する根表面にできる傷口から侵入・感染する，いわゆる物理的な接触感染であることが知られている．一方，ここで挙げたその他のウイルス（MNSV, MLBVV, LBVaV, BNYVV, TMMMV, TuSV）は, 土壌中に広く生息する絶対寄生菌（*Olpidium* 属菌，あるいは *Polymyxa* 属菌）により媒介される生物的伝搬である．

臭化メチル剤は，施設栽培における土壌伝染性ウイルス病防除の特効薬として苗定植前の土壌くん蒸に広く利用されてきた．本剤使用によるウイルス病防除技術に代わる同等の効果を発揮する防除技術は，今のところ見あたらない．クロルピクリン・D-D 混合剤やヨウ化メチル剤などを利用した化学的防除法の開発も進められているが，下位葉縁が褐変する薬害を生じることが希にあることから，この回避策を検討しなければならない．

一方，化学農薬のみに頼る防除法は，本来励行しなければならない作業を失念させてしまうことがある．従来の耕種的防除法である，健全な苗・資材・器具の使用と圃場の浄化や栽培方法・肥培管理の改善，あるいは抵抗性品種の利用などを再確認する必要がある．また，近年普及してきた熱水・蒸気による土壌消毒処理に代表される物理的防除法を取り入れた栽培プログラムを実施することも，土壌伝染性ウイルス病の発生頻度を抑える試みとして重要である．私たちは，ピーマンに発生する PMMoV を対象として，ポスト臭化メチルを視野に入れた環境保全型病害管理技術の開発に着手している．その取り組みについて紹介したい．

３　PMMoV によるピーマンモザイク病の総合防除への取り組み

トバモウイルス属の PMMoV は，ピーマンやトウガラシにモザイク病を引き起こす重要ウイルスである．本ウイルスに感染したピーマンやトウガラシは，葉に凹凸を伴う明瞭なモザイク症状を示し生育が抑制される．また，果実の果皮が黄化したり奇形果が発生し，商品価値を著しく損なう．PMMoV によるモザイク病は，1972 年に尾崎らにより報告されて以来[1)]，日本各地で発生が確認されている[2,3,4,5,6,7)]．

PMMoV は非常に安定なウイルスで，あらゆる場面で感染性を長期間保持している．さらに，接触伝染力が強く管理作業等で株から株へ容易に伝染するため，連作地域では本病が慢性的に発生し，経済的被害を与え続けている．PMMoV の一次伝染は主として種子伝染と土壌伝染による．種子伝染は 70℃，3 日間の乾熱種子消毒により効果的に抑制できることが判明している[4)]．本病に対しては，臭化メチル剤に代わる土壌くん蒸剤は開発されておらず，代替技術の確立は喫緊の課題である．

４　土壌からのウイルス検出法の確立

種子伝染を除き PMMoV の一次伝染源は汚染土壌とされており，適切な防除法を選択するためには圃場のウイルス汚染程度を把握することが重要である．従来の土壌中のウイルス検出方法は，緩衝液による土壌の抽出液をタバコ等の検定植物に接種して，病斑数を測定する生物検定法が主である．しかしながら，検定植物の育苗場所の確保や操作の煩雑性など，多数の試料を検定するには不向きである．一方，酵素結合抗体法（ELISA）は，コストも比較的安く，迅速かつ大量の試料を同時に検定できる．土壌中のウイルス検出法として，簡便な間接 ELISA 法が既に開発されているが[8)]，非特異反応が出やすいことが指摘されている．

我々は，特異性の高い二重抗体サンドイッチ法（DAS-ELSIA 法）による土壌からの高感度ウイルス検出法を検討した．その結果，リン酸緩衝液に 2％ スキムミルクと 0.05％ Tween 20 を添加した土壌の抽出液を用いることにより，非特異的な反応を抑えウイルスを効率よく検出することに成功した[9)]．今回確立した方法により，茨城県内のピーマン圃場から採取した土壌中の PMMoV 検出を試みたところ，モザイ

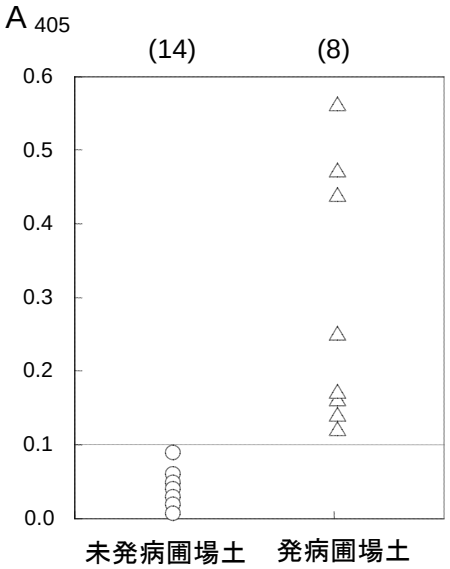


図１　ピーマン栽培圃場における PMMoV の土壌汚染度調査
上記（ ）内は，調査圃場数を示す．

ク病発生圃場の全ての土壌において測定値（A_{405}）が 0.1 以上であったのに対し，未発生圃場の土壌は 0.1 以下であった（図 1）．全国各地の主要ピーマン栽培圃場から採取した土壌からもほぼ同様な結果が得られた．よって，本法はピーマン圃場の土壌中におけるウイルス病汚染程度の定植前圃場診断技術として利用できることが示された．

５　抵抗性品種の利用による防除

ピーマンやトウガラシが属するカプシカム属には，トバモウイルスに対して抵抗性を示す *L* 遺伝子を保有している野生種が知られている．それらは，L^1，L^2，L^3，L^4 の４つの異なる遺伝子が同一の遺伝子座において対立遺伝子的な遺伝様式を示すとされている [10]．また，これら 4 つの *L* 遺伝子に対応するように，トバモウイルスは P_0 型，P_1 型，$P_{1,2}$ 型，$P_{1,2,3}$ 型と 4 種類の病原型に分けられている．つまり，L^2 遺伝子を打破する $P_{1,2}$ 型トバモウイルスは同時に L^1 遺伝子を打破するため，一度抵抗性が破られると L^2 遺伝子より下層の抵抗性遺伝子を保有する品種では，ウイルス感染の拡大を止められない．従って抵抗性品種を開発する際には，現状発生しているウイルスの病原型を把握した上で，そのウイルスに適した抵抗性遺伝子を導入することが重要である．現在では，L^3 遺伝子を導入した品種の普及が進んでいるが，それを打破するウイルス系統も発生し，全国を席巻してしまった [11]．そこでその L^3 遺伝子を打破するウイルス系統の感染拡大を止めるために，最後の砦としていた L^4 遺伝子を保有するピーマン品種が開発された．L^3 遺伝子打破ウイルス系統が蔓延っている産地で栽培を開始した当初は高い防除効果が発揮されたが，産地導入後１～２年の間に残念ながらその抵抗性遺伝子も凌駕する L^4 遺伝子打破新型ウイルス系統が発生してしまった [12]．今後，L^4 遺伝子打破系統ウイルスの全国的な蔓延化を防ぐためにもウイルス，甚発生地域で１作の作付等，圃場土壌中のウイルス濃度を下げるためのクリーニングクロップとしての利用等に限定し，決して連作などをしないような栽培上の工夫を考えていかなければならない．

６　弱毒ウイルス（ワクチン）による生物防除

弱毒ウイルス（ワクチン）を利用した生物防除法は，環境保全型農業を実践する上で，さらに抵抗性品種に対する打破系統ウイルスが発生している現状の克服には期待される技術である．従来，PMMoV 強毒株に対して４種類の弱毒ウイルス株が作出されているが [13,14,15,16]，栽培条件によってはモザイク症状が現れ，生育に影響が出る場合が認められていた [17]．これらの弱毒ウイルス株は，L^3 遺伝子を持つピーマン品種では弱毒ウイルスを接種した部分にえそ斑が生じ全身移行しないため干渉効果を発揮することができない．そこで当研究センターでは，L^3 遺伝子を持つピーマン品種においても全身に行き渡りしっかりと

した干渉機能を発揮する弱毒ウイルス（ワクチン）を選抜した[18]．ワクチンを子葉期に接種したピーマン（品種：みおぎ(L^{3} L^{+})、日本園芸生産研究所）を当センターのウイルス汚染圃場で４月～９月の間栽培（半促成栽培）したところ，そのワクチン処理ピーマンは全栽培期間を通して外観正常であった（図２）．収穫初期から強毒ウイルスで汚染した摘果ハサミでそのワクチン接種ピーマンの整枝・摘果等の管理作業を行っても発病は一切認められなかった（表２）。先の半促成の慣行栽培（約 3a）において，ワクチン接種ピーマンの果実収量を健全区並びに強毒ウイルス感染区のそれぞれと比較すると，強毒ウイルス感染区には明白な有意差が認められたが健全区では認められなかった（図３）．今後は，現有の抵抗性品種を生かす上に置いても，またその抵抗性遺伝子を打破する新型ウイルス系統の発生を未然に防ぐためにも，本弱毒ウイルスを核とした生物防除技術を日本全国のピーマン産地で広く展開していく必要がある．そのためには，本弱毒ウイルスを接種したピーマンにおいて，全国のピーマン産地における干渉性の実証試験や様々なピーマン品種での収量性等への経済的影響を評価していかなければならない．

図2．栽培圃場におけるワクチン接種ピーマンと罹病ピーマン（左からワクチン接種、罹病、健全の生長点（上段）と全体（下段））

表2．収穫時にウイルス汚染ハサミを使用した際のワクチン接種ピーマン防除効果

摘果月日	入鋏回数									
	無接種株					ワクチン接種株				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
6月1日	5	5	2	5	3	3	5	4	5	3
6月9日	6	5	6	6	7	7	9	6	4	6
6月15日	8	4	9	14	13	3	12	10	8	11
6月22日	16	発病	13	15	19	13	17	16	13	12
6月29日	18		13	15	23	22	12	9	15	10
7月5日	発病		発病	発病	12	15	7	10	8	14
7月12日					発病	4	14	24	11	10
7月20日						25	23	13	22	6
7月27日						32	8	13	10	37
8月3日						無発病	無発病	無発病	無発病	無発病
合計入鋏回数	53	14	43	55	77	124	107	105	96	109

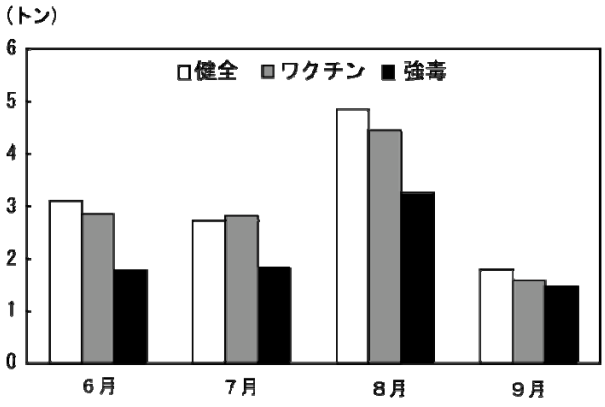


図3．ワクチン接種ピーマンの月別収量調査（10a 換算）の比較

7　土壌伝染を抑える技術

7.1　ピートモス成型ポットを利用した土壌伝染抑制

PMMoVによるモザイク病は移植直後に発病した場合，その後の生育抑制が大きく，20～50%の減収となる．寒天培地を用いたモデル試験により，PMMoVの土壌伝染は移植時に生じる根の傷口からの感染が主原因と考えられたため[19]，数種の異なる移植法によるウイルス発病株率の違いを調査した．ポット苗から土をふるい落とし根が剥き出しの状態で汚染土に移植（土壌落とし苗移植）した場合，約80%の発病株率を示した．しかし，ピートモス成型ポットで育苗した苗をそのポットごと汚染土に移植（ピートモス成型ポット苗移植）した場合は0～14%の発病株率に抑えられ，十分な発病抑制効果が確認された（図４）[20]．このことは，移植作業時に生じた根面上の微少な傷からウイルスが侵入・感染するという理論を傍証しており，圃場現場における実際の定植作業においても苗の根が直接汚染土に触れないよう根圏を保護することが重要であることを実証している．今後，実用化にあたってコストや利便性を考慮して，ピートモス成型ポット以外の保護資材の検索・利用も検討すべきであろう．

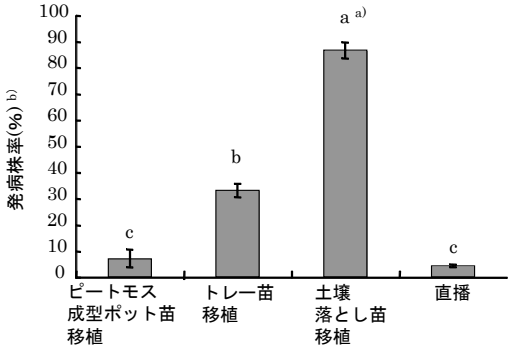


図４　PMMoV汚染土へのピーマン苗の異なる移植法とその後のモザイク病発病株率

a）異なる文字は、Turky検定により，1%水準で有意差があることを表す．
b）発病株率は３反復の平均

7.2　熱水（蒸気）土壌消毒によるウイルスの不活性化

熱水または蒸気土壌消毒法は，臭化メチル剤利用土壌消毒法に代わる技術として様々な病害虫に対して防除効果が確認されている．そこで，熱水土壌消毒法についてトバモウイルス病に対する防除効果を検討した．各種トバモウイルスの罹病植物をガーゼに包み異なる深さに埋め込み，透明ポリフィルムで覆った土壌表面に 95℃の熱水（200 liter/㎡）を散水した．処理５日後に各深さに埋め込んだ試料を取り出し，生物検定法によりウイルス活性を測定した．その結果，土壌温度が 90℃以上に上昇した深さ 5～10cm では何れの試料中のウイルスも不活性化したが， 15cm 以下の深さに埋めたウイルスはその活性は低下したものの依然として感染性を保持していた．これらのことから，90℃以上の土壌温度が確保できる比較的表層であれば，本法はウイルスを確実に不活性化し，トバモウイルス病の防除に有効であると考えられた[21]．

一方，ウイルス汚染土の上に滅菌土を 10cm 以上重層して移植した場合，土壌伝染は起こらなかった[21]．前述のピートモス成型ポット移植の事例とも併せ，土壌伝染は移植時の傷によって起こり，その後の根の自然伸張期時には，ウイルス感染は起こらないのであろ

うと考えられる[19]．このことから，比較的表層のウイルスを確実に不活性化できれば，移植時の土壌伝染を抑えられる可能性がある．最近，圃場レベルにおける土壌の蒸気消毒によりトバモウイルスの土壌伝染が抑制された例が報告された[22]．今後，土壌内病原菌・ウイルス・線虫害等との同時防除を目標として熱水または蒸気消毒技術の利用を積極的に検討していくが必要があろう．

7.3　土壌への有機質資材の添加によるウイルス不活化の促進

一般にトバモウイルスは安定性が高く，PMMoV については土壌中の根で６ヶ月以上感染性を保持すると報告されている[4,5]．また，PMMoV 罹病残渣を土壌に混和することで，土壌伝染が容易に起こる[6,20,23]．このことから，圃場では土壌中の植物残渣に感染性を持つウイルスが長期間残存し，伝染源になっていると推察される．そこで，土壌中植物残渣に含まれる PMMoV の不活性化を積極的に促進するため，種々の有機質資材を土壌に添加して PMMoV の不活性化程度を比較した．その結果，各種資材の中ではセルロース添加によって PMMoV の不活性化が最も促進されることが確認された[24]．また，培養開始時に抗生物質を添加したところ，セルロースを添加したことによる PMMoV 不活性化効果が消失した．よって，セルロース添加による PMMoV の不活性化促進には，土壌中に生息するセルロースを分解する微生物が重要な役割を果たしていると推察される．

８　管理作業によるウイルスの接触・感染阻止技術

トバモウイルスは接触伝染するため，わずかな発病でもその後の管理作業で容易に圃場全体に蔓延する. 現在までに, 多くの抗ウイルス剤の探索が行われてきた[25]. そのなかで，シイタケ菌糸体抽出物であるレンテミン（野田食菌工業）またはスキムミルクの葉面散布が，優れたウイルス感染阻止効果を発揮した[4,26,27]．本剤による感染阻止の作用機構は，薬剤が糊のような働きをしてウイルス粒子が凝集することにより，その後の感染が阻止されると推察された[26]．現在，レンテミンは抗ウイルス剤として唯一農薬登録されており，作業時の手指・器具消毒および移植・摘芽・誘引などの作業時直前散布により，キュウリ，トマト，ピーマン，タバコおよびシンビジウムに対するトバモウイルスの接触・感染阻止剤（農薬）として販売されている．

群馬県ではトマトの管理作業時に使用するハサミで接触伝染するトマトかいよう病が問題となっている．本病の伝染を防止するひとつの方法として，収穫用採果ハサミで一旦握った後解放する際にハサミの刃の部分に液体を噴霧する仕組みを持つ「消毒液自動噴霧ハサミ」が開発・利用されるようになった[28]．そのハサミは，現在市販されている．そこで私たちは，その「消毒液自動噴霧ハサミ」をピーマンの剪定作業等に用いることにより PMMoV の接触伝染阻止効果を検討した．本ハサミの刃先を PMMoV 罹病葉粗汁液で汚

染させ，レンテミン溶液やスキムミルク溶液により刃先を自動噴霧洗浄後，ピーマン葉に切り込み接種した．無処理区では 20 株中 14〜20 株が感染したのに対して，消毒液処理区では 20 株中 0〜2 株に抑えられ，高い接触伝染阻止効果が確認された [29)] ．今後は，ウイルス病用処理液と殺菌剤との混合液を用いることにより，管理作業用「消毒液自動噴霧ハサミ」を使用したウイルス病と接触伝染性細菌病の同時防除が可能と考えられる．

９　まとめ

オゾン層を破壊するとされる土壌くん蒸剤の臭化メチル剤は 2012 年以降完全に撤廃されるが，PMMoV 抵抗性ピーマン品種に対する打破系統ウイルスが全国的に広く発生している現状では，本技術に代わる防除法，特に環境保全型での防除技術体系を確立することは容易ではない．従って，現有の抵抗性品種の利用を軸としながら，本稿で述べた種々の防除技術を組み合わせ，ピーマンモザイク病の発病を抑える総合防除技術のシステム化が肝要と思われる．

引用文献

1) 尾崎武司・荒井　滋・高橋　実．1972．トウガラシから分離されたタバコモザイクウイルスの 1 系統について．日植病報．38: 209
2) 後藤英世・花田　薫・板井　隆・佐藤俊次・藤澤一朗．1993．大分県のピーマンから検出されたウイルス．九病虫研会報．39: 48-51
3) 後藤忠則・土崎常男・飯塚典男．1981．北海道のトウガラシから分離されたタバコモザイクウイルス．日植病報．47: 409-410
4) 長井雄治．1981．タバコ・モザイク・ウイルスに起因するトマトおよびピーマンのモザイク病の防除に関する研究．千葉農試特報．9: 1-109
5) 長井雄治・竹内妙子・栃原比呂志．1981．タバコ・モザイク・ウイルス-トウガラシ系によるピーマンのモザイク病．日植病報．47: 541-546
6) 竹内繁治．2000．*Capsicum* 属植物におけるトバモウイルス病の発生生態とその防除に関する研究．高知農技セ特報．3: 1−53
7) 津田新哉・山中雅典・Atiri, G.I.・千葉恒夫・藤澤一朗．1995．茨城県神栖町ピーマン栽培地帯のウイルス病発生調査．関東病虫研報．42: 79-81
8) Takeuchi, S., Hikichi, Y., Kawada, Y., Okuno, T. 2000. Detection of tobamoviruses from soils by non-precoated indirect ELISA. J. Gen. Plant Pathol. 66: 153-158
9) Ikegashira, Y., Ohki, T., Ichiki, U.T., Higashi, K., Hagiwara, T., Omura, T., Honda, Y., Tsuda, S. 2004. An immunological system for the detection of *pepper mild mottle virus* in soil

from green pepper fields. Plant Dis. 88: 650-656

10) Rast, A.T.B. 1988. Pepper tobamoviruses and pathotypes used in resistance breeding. Capsicum Newsletter. 7: 20-23

11) Tsuda, S., Kirita, M., Watanabe, Y. 1998. Characterization of a pepper mild mottle tobamovirus strain capable of overcoming the L^3 gene-mediated resistance, distinct from the resistance-breaking Italian isolate. Mol. Plant-Microbe Intract. 11: 327-331

12) Genda, Y., Kanda, A., Hamada, H., Sato, K., Ohnishi, J., Tsuda, S. 2007. Two Amino Acid Substitutions in the Coat Protein of *Pepper Mild Mottle Virus* Are Responsible for Overcoming the L^4 Gene-Mediated Resistance in *Capsicum* spp. Phytopathology, 97: 789-793

13) 後藤英世・板井　隆・佐藤俊次．1997．タバコモザイクウイルス-トウガラシ系およびキュウリモザイクウイルスによるピーマンモザイク病防除のための弱毒ウイルスの作出とその効果．大分農技セ研報．27: 79-122

14) 後藤忠則・飯塚典男・小餅昭二．1984．タバコモザイクウイルス・トウガラシ系統の弱毒ウイルス作出とその利用．日植病報．50: 221-228

15) 長井雄治. 1987. タバコモザイクウイルス-トウガラシ系弱毒ウイルス, C-1421 の作出. 日植病報．　53: 168-174

16) 米山伸吾・塚本ひで子．1986．TMV-P によるピーマンウイルス病の防除 (2) 弱毒ウイルスによる防除効果（その２）．日植病報．52: 562

17) 三浦猛夫・日高　透・川越　仁．1988．弱毒ウイルス利用によるピーマンモザイク病（TMV-P）防除．九病虫研報．34: 25-29

18) 津田新哉・大木健広・大熊哲仁・藤澤一郎．2007．トウガラシマイルドモットルウイルスワクチン接種ピーマンの圃場での干渉能と収量．研究成果情報．共通基盤・病害虫(病害)、関東東海北陸農業・関東東海・病害虫(病害)

19) 大木健広・津田新哉・本田要八郎．2003．トウガラシマイルドモットルウイルスの土壌伝染要因の解析．日植病報．69: 334

20) 大木健広・津田新哉・本田要八郎．2003．ピートモス成型ポット移植によるトウガラシマイルドモットルウイルス（PMMoV）の土壌伝染抑制．関東病虫研報．50: 29-32

21) Honda, Y., Ohki, T., Mikoshiba, Y., Kobayashi, Y.O. 2004. Traial for inactivation of soil-borne tobamoviruses by soil sterilization with hot water in plastic-film house. Proceedings of the 15th International Plant Protection Congress, in Beijing. p 695

22) 竹内繁治・川田洋一．*Pepper mild mottle virus* の土壌伝染に対する蒸気消毒の防除効果．2004．日植病報．70: 238

23) Pares, R.D., Gunn, L.V. 1989. The role of non-vectored soil transmission as a primary source of infection by pepper mild mottle and cucumber mosaic viruses in glasshouse-grown capsicum in Australia. J. Phytopathol. 126: 353-360

24) 岡　紀邦・大木健広・本田要八郎・松本英樹・西尾　隆．2004．土壌へのセルロース添加によるトウガラシマイルドモットルウイルスの不活性化促進．土肥誌．75: 673-677
25) 下村　徹．1984．抗植物ウイルス剤の実用性と研究の現状．植物防疫．38: 316-320
26) 日比忠明・本田要八郎・小室康雄．1981．数種抗ウイルス性物質の探索．日植病報．44: 394
27) 井上　満・青木宏史．1983．ピーマンの TMV 症状とスキムミルク散布によるその防除．農業および園芸．58: 1158-1162
28) 漆原寿彦・原　昌生・小林修武・酒井　宏・白石俊昌．2002．消毒液自動噴霧ハサミによるトマトかいよう病の防除．関東病虫研報．49: 39-41
29) 本田要八郎・大木健広・久下一彦・細川　健．2005．消毒液自動噴霧ハサミを利用したピーマンモザイク病の接触伝染防止．関東病虫研報．51:　176

野菜糸状菌病の診断技術

野菜茶業研究所
野菜 IPM 研究チーム
窪田昌春

１．野菜の糸状菌による病害（日本植物病理学会編（2000）、日本植物病理学会（2009））

日本植物病名目録によると、2008 年 12 月現在で、日本植物病理学会に登録されている野菜の病害は、25 科 89 作物（77 種）について 1171 あり、そのうち糸状菌によるものは 759 ある。

これらのうち、菌糸を持たない変形菌による病害にはアブラナ科作物の根こぶ病（菌：*Plasmodiophora brassicae* Woronin）と他 4 種による変形菌病がある。根こぶ病では、地上部の萎凋に至る。変形菌病の病原菌は植物に対する寄生性はないが、土壌や作物表面で増殖することにより、作物の水・養分の欠乏や窒息による症状を引き起こす。

無隔壁菌糸を形成する卵菌類に属する野菜の病原菌は、アブラナ科作物の白さび病菌（*Albugo* 属）、各種作物のべと病菌類（*Blemia*、*Peronospora*、*Pseudoperonospora*、*Plasmopara* 属）、*Phytophthora* 属菌（主として疫病の病名を与える）、*Pythium* 属菌、*Aphanomyces* 属菌である。こられのうち、白さび病菌以外の病原菌の主たる病原因子は、植物細胞壁分解酵素であり、植物組織の水浸状腐敗を病徴とする。べと病は葉、*Phytophthora* 属菌はほぼ全ての部位、*Pythium* 属菌は主に茎・根・果実、*Aphanomyces* 属菌は茎・根で発病させる。*Pythium*、*Aphanomyces* 属菌は苗立ち枯れの原因となることが多い。*Phytophthora*、*Pythium* 属菌は、養液栽培における根腐れの主原因でもある。白さび病菌とべと病菌は絶対寄生菌であり、培地上での培養ができない。一方、*Phytophthora*、*Pythium*、*Aphanomyces* 属菌は培地上で白色の菌糸をよく伸長し、罹病植物上でもしばしば白色菌糸を発生させる。

※べと病菌類の学名は、近々変更される可能性高い

真菌の接合菌類に含まれる野菜の病原菌は、茎葉と果実の腐敗を起こすこうがいかび病菌（*Choanephora cucurbitarum* (Berkeley & Ravenel) Thaxter）と果実腐敗を起こす *Rhizopus stolonifer* (Ehrenberg: Fries) Vuillemin があり、両菌による病徴では、水浸状に腐敗する罹病組織表面に太い白色菌糸が発生し、黒色の胞子のうや胞子塊が、肉眼でも黒点として認められる。

担子菌類による病害では、各種作物茎葉のさび病菌（*Aecidium*、*Coelosporium*、*Goplana*、*Puccinia* 属菌）、白絹病菌（*Sclerotium rolfsii* Saccardo）や *Rhizoctonia solani* Kühn による苗立ち枯れ等の茎葉地際部の腐敗、根の腐敗となる紫紋羽病（*Helicobasidium mompa* Tanaka）、ネギ類の黒穂病（*Urocystis cepulae* Frost）が代表的である。さび・黒穂病菌は絶対寄生菌であり、培地での培養ができない。

上記以外の野菜病原菌の真菌は子のう菌とその不完全世代に属し、85 属 214 種と種未同定 59 菌株を含む。それらのうち、果実・茎の腐敗を起こす病原菌の代表は菌核病菌（*Sclerotinia sclerotiorum* (Libert) de Bary）、灰色かび病菌（*Botrytis cinerea* Persoon: Fries）、*Phomopsis*、*Penicillium*、*Fuarium* 属菌であり、ほとんどがいろいろな植物に感

染できる多犯性病原菌である。葉に褐変を伴う病斑を形成する真菌病原菌類は、*Mycosphaerella*、*Phoma*、*Colletotrichum*、*Septoria*、*Alternaria*、*Cercospora*、*Pseudocercospora* 属菌、*Corynespora cassiicola* (Berkeley et Curtis) Wei などであり、これらの病原菌の病原因子は、菌の二次代謝産物である毒素と考えられる。これらの菌では、種間、または種内で分けられるグループ等により、宿主特異性が認められるものが多い。根腐れを引き起こす病原菌では、緩やかな宿主特異性を持つ *Fusarium solani* (Martius) Saccardo とウリ科作物を侵す *Phomopsis sclerotioides* van Kesteren が代表的である。根の褐色腐敗を起こす病原菌は、*Cylindrocarpon* と *Pyrenochaeta* 属菌、根から植物の導管に侵入して萎凋症状を引き起こすものでは *Fusarium oxysporum* Schelchitendal: Fries と *Verticillium* 属菌が代表となる。*F. oxysporum* は根の褐色腐敗を伴う場合もある。これらのうち、*F. oxysporum*、*Verticillium dahliae* Klebahn では、種内において宿主特異性が異なるグループが存在し、*F. oxypsorum* の場合、分化型（forma specialist：f. sp）で記される。さらには宿主植物種をともにするグループ内でも、異なる抵抗性遺伝子を持つ品種に対する感染性が異なる、レースの分化が見られる場合もある。葉表面に菌叢を生じる病原真菌は、種間や種内グループでの宿主特異性が強く、うどんこ病菌が代表的である。

主な分類		主な内訳	主な分類		主な内訳
アブラナ科根こぶ	7	(*Plasmodiophora brassicae*)	変形菌	11	*Physarum* 7, *Didymium* 3
べと	33	*Pseudoperonospora* 10, *Peronospora* 20,	*Pythium*	66	*myriotylum* 6, *ultimum* 9, *aphanidermatum* 13,
Phytophthora	49	*capsici* 10, *nicotiana* 12, *porri* 7	*Aphanomyces*	4	
アブラナ科白さび	9	*Albugo macrospora* 6	さび	17	*Puccinia* 12
Rhizoctonia	57	*solani* 50	*Sclerotium*	31	*rolfsii* 24, *epivorum* 5
紫紋羽	4	(*Helicobasidium mompa*)	*Sclerotinia*	35	*sclerotiorum* 28
Mycosphaerella	5		アブラナ科輪紋	4	(*Asteromella brassicae*)
墨腐	4	(*Macrophomina phaseolina*)	*Pyrenochaeta*	10	*terrestris* 7
葉で分生子殻	73	*Ascochyta* 8, *Phoma* 26, *Septoria* 17 *Phomopsis* 11, *Phyllosticta* 10	炭疽	43	*orbiculare* 10, *actatum* 5 *gloeosporioides* 7
Fusarium	85	*oxysporum* 50, *solani* 13	*Botrytis*	34	*cinerea* 24
Cylindrocarpon	7	*destractans* 4	*Penicillium*	8	
Stemphylium	10	*botryosum* 4, *lycopersici* 3	果実バラ色かび	4	(*Trichothecium roseum*)
針状胞子	39	*Cercospora* 34, *Pseudocercospora* 5	*Cladosporium*	7	*cucumerinum* 4
Corynespora	10	*cassiicola* 8	*Verticillium*	30	*dahliae* 25
うどんこ	45		環紋葉枯	5	(*Cristulariella moricola*)
Alternaria	36	*alternata* 5, *porri* 4, *solani* 4, *brassicae* 6, *brassicicola* 4,	接合菌	10	*Choaenephora cucurbitarum* 6, *Rhizopus stolonifer* 4
他	54	42 属 47 種 7 未同定			

（灰色網掛け字は今回触れていません）

２．野菜主要病害の診断法

まず、肉眼による病徴観察と、病徴写真が掲載された文献、あるいは自らの経験・記憶を比較し、さらに、栽培管理や環境条件も含めた発生状況も勘案して、「あたり」を付ける。肉眼による病徴観察のみで診断できる病害もあるが、できない場合には、罹病部位を顕微鏡観察して、各病原菌に特徴的な形態を探す。そこまでが、即座にできる診断作業である。以上で診断ができない場合には、糸状菌による病害ならば菌の分離を行い、高頻度で分離できる病原菌の形態を顕微鏡観察して、その特徴から同定する。菌を分離する際には必ず雑菌も分離されるので、病原菌との見分けが必要である。細菌病原菌の場合には単コロニー分離を行い、それらの複数について化学的な定性作業となるが、ここでは省略する。

菌の分離も困難な場合、細菌または糸状菌による病害であることが確かならば、罹病組織を健全な宿主植物に刺し込むなどして接種を行い、再発病したところから上記の診断作業を行う。

本稿では述べないが、一部の病原菌について特異的な PCR プライマーが作成されてきており、罹病組織から抽出した DNA を PCR することにより、その罹病部位における特定の病原菌の存在を確認できる。今後の DNA 抽出法の改良や、1 回の PCR で複数の菌が検出できる技術の開発等により、PCR のみにより病害診断ができるようになる可能性があり、注目すべき技術と考えられる。

本稿では具体的な方法等は記さないが、新病害等も含めて、より正確な診断が必要な場合には、コッホの 3 原則を満たすよう、単菌糸または単胞子による病原菌の分離、分離菌株の接種・再分離を行った上で、病原菌を正確に同定しなければならない。糸状菌の場合、形態分類に加え、DNA 抽出して 5.8S リボゾーム遺伝子を含む internal transcribed spacer 領域（ITS）の DNA 塩基配列を決定し、既知のものと比較することで分子系統学的に菌の同定が可能である（White ら、1990）。しかし、現状、塩基配列を決定するためには、菌の分離が必要であり、菌分離後の形態観察との労力・時間・設備・コスト等の面の比較から、分子分類は補助的なもの、あるいは精度を高めるものとして位置付けられることが多い。ただし、微生物分類全般において、近年、分子系統分類に沿って、形態的な特徴を仕分ける動きが強くなってきており、今後の動向に注意する必要がある。

なお、本稿では、主要病害の典型的な病徴等のみについて紹介し、特殊な事例や頻度の低い例外的な事例については記さない点をご了承願いたい。また、各機関の条件等によって、より適切な方法を検討するとともに、各自で多くの観察・診断経験を積んでいただきたい。

１）必携の参考図書

★日本植物病害大事典．岸國平編（1998）、全国農村教育協会　※病徴写真多数

野菜病害の見分け方．我孫子和雄・岸国平（2003）、全国農村教育協会　※病徴写真多数

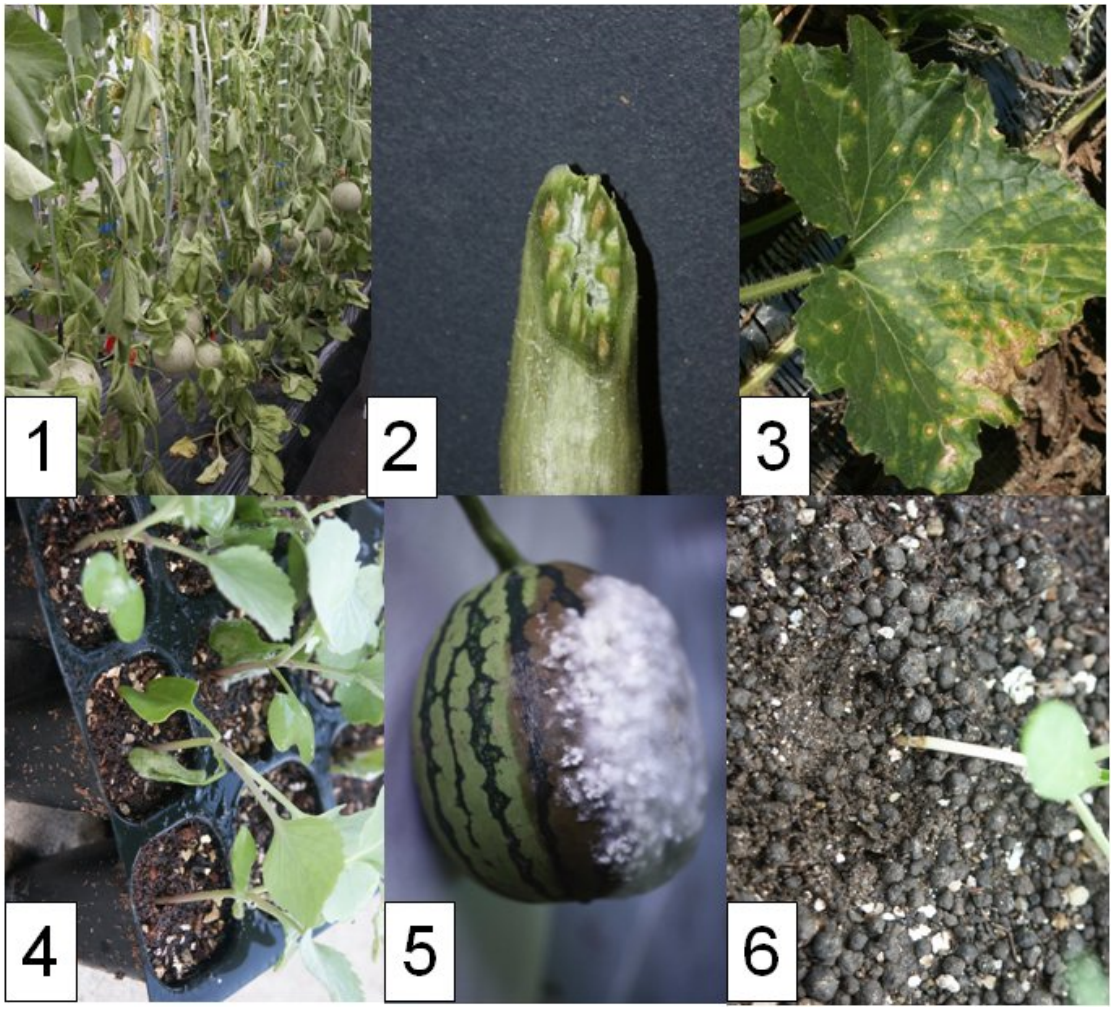
★日本植物病名目録．日本植物病理学会編（2000）、日本植物防疫協会

★日本植物病名目録追録．日本植物病理学会（2009）、当学会 HP

２）肉眼による病徴観察（経験、発生状況も踏まえて）

①栄養障害、化学物質等による障害、環境ストレスによる障害、ウイルス病、糸状菌・細

菌病、虫害、線虫害の見分け
※病原菌・虫害によらないものは、圃場の中である程度の面積で一様に発症する。
※ウイルスは頂芽での奇形が認められる
②植物器官の症状による糸状菌病原菌の推測
・萎凋性（導管内での菌繁殖による閉塞・毒素による、導管褐変、下葉から黄化）
Fusarium oxysporum による病害（ウリ科つる割・トマト萎凋・アブラナ科萎黄・ネギ類乾腐病などの病名）
Verticillium 属菌による病害（半身萎凋・アブラナ科バーティシリウム萎凋病などの病名）：*F. oxysporum* によるものより病徴が弱く、低温で発生
※根こぶや根の腐敗による場合もあり



1. *Fusarium oxysporum* によるメロンつる割病、2. メロンつる割病茎断面、3.トウガンつる枯病（毒素型病斑）、4.*Pythium ultimum* によるキャベツピシウム腐敗病、5.*Pythium aphanidermatum* によるスイカ綿腐病、6.*Rhizoctonia solani* によるホウレンソウ株腐病

・腐敗性（植物細胞壁分解等により、強い変色を伴わない）
根・茎：*Fusarium solani*、疫、*Pythium* 属菌、*Rhizoctonia solani*、菌核、白絹

茎・葉：疫、べと、灰色かび、菌核、接合菌類

果実：疫、*Pythium* 属菌、灰色かび、菌核、*Fusarium* 属菌、接合菌類

※組織が古くなり、酸化されれば、変色（褐変）に至る

・毒素による病斑（初期の黄化から褐変など）

茎・葉・果実：*Alternaria* 属菌、炭疽、分生子殻を作る菌、*Cercospora*、*Pseudocercospora* 属菌、*Corynespora cassiicola*、*Stemphylium* 属菌

根：*Cylindrocarpon*、*Pyrenochaeta* 属菌

※高湿度では「腐敗性」と同様となる場合もある

・葉表面のかび：うどんこ、さび、トマト葉かび、すすかび

③組織の症状からの推測（肉眼または実体顕微鏡（虫眼鏡）による観察）

・表面から侵す（初期に表面凹凸やくびれ）

Rhizoctonia 属菌、菌核、白絹、*Pythium* 属菌、*Fusarium solani*

・組織内侵入（初期に表面の凹凸や崩壊が少ない）

疫、べと、炭疽、*Cercospora*、*Pseudocercospora* 属菌、葉表面に菌叢を生じる菌、分生子殻を生じる菌、萎凋性病原菌

④（見慣れれば）肉眼観察だけで診断できるもの

菌核病－白色綿毛状で細い菌糸の菌叢から数 mm・黒色・表面平滑・ネズミ糞状の菌核形成

白絹病－太い白色菌糸から 2mm 以下程度で茶色・球状の菌核形成

灰色かび病－罹病組織表面に灰～茶色でくすんだ色調のもこもことした菌叢

Penicillium による果実腐敗－果実表面のいわゆる青かびや粉状で濃い白色菌叢

接合菌による病害－罹病部表面に太い白色菌糸を多数発生させ、微小黒点（胞子のうや胞子塊）が混じる

アブラナ科白さび病－葉裏に円形で密な白色菌叢、茎上部の奇形や白色菌塊

トマト葉かび・すすかび病－葉裏の白～茶・紫・灰・黄褐色の円形菌叢、葉かび・すすかび間の区別は困難

うどんこ病－葉表面の円形・粉状白色菌叢

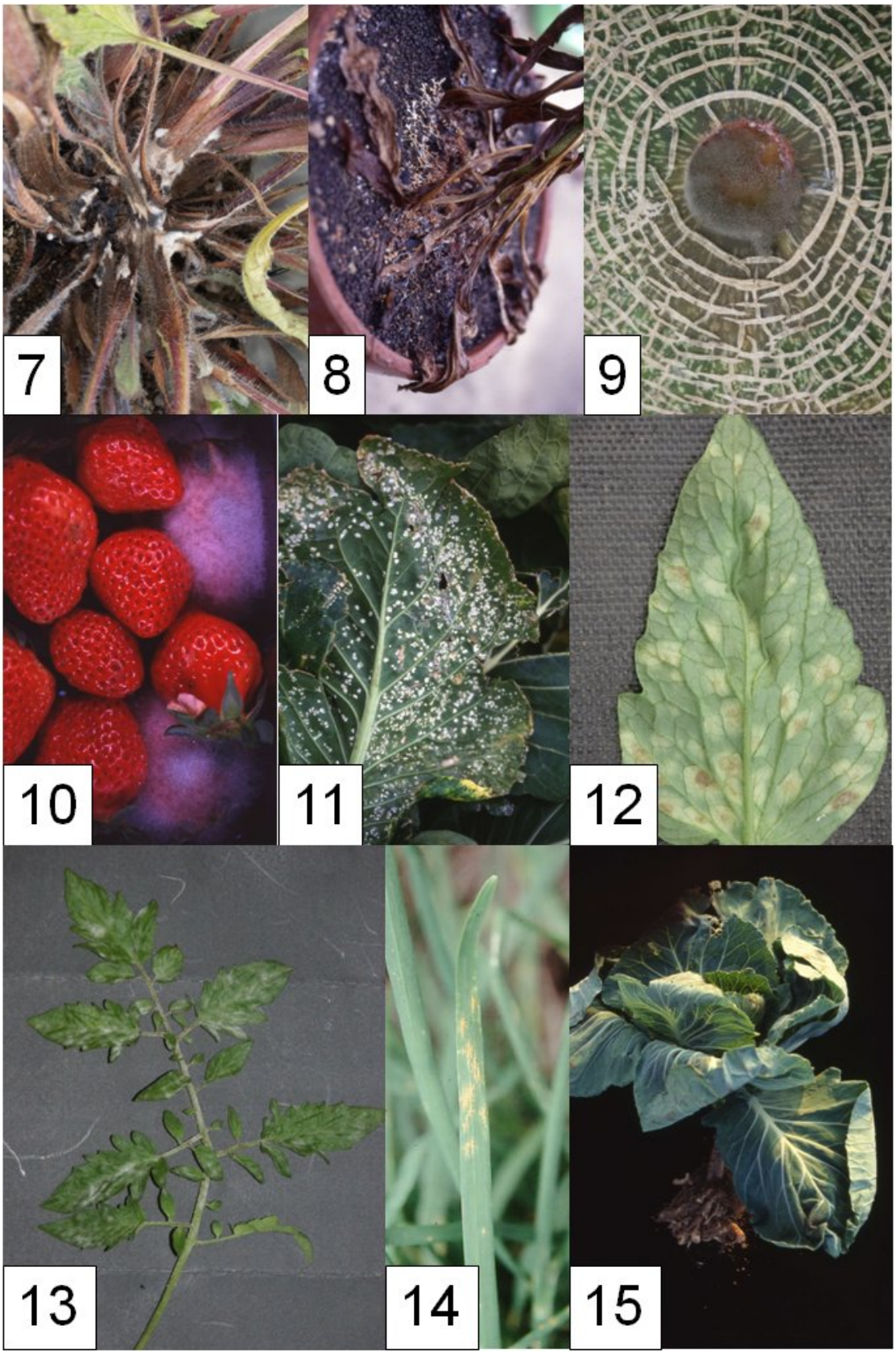
さび病－ユリ・キク・セリ科作物葉裏の赤～黄色などの粉状・不整形菌叢

アブラナ科作物根こぶ病－根こぶ（線虫によるものより数が少なく、大きくなる）

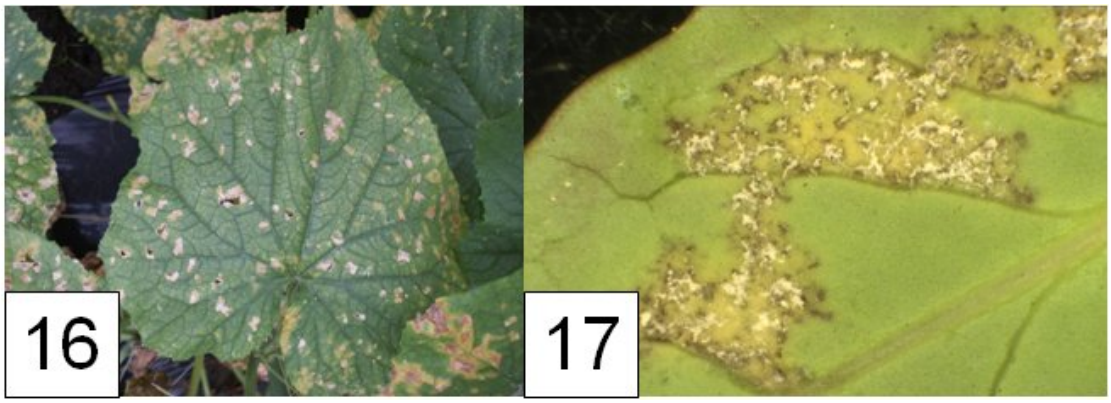
べと病－セリ・ウリ・ユリ・アカザ・アブラナ科作物の葉の葉脈に囲まれた不整形の水浸状～黄色病斑、葉裏病斑部に薄い菌叢あり

※これらの標徴が認められればほぼ確実だが、環境条件によってはこれらの標徴が現れない場合もある。

※地上部の病害で雑菌が少なければ、罹病組織を高湿度に保つと標徴が現れる可能性が高い。



7.菌核病、8.白絹病、9.灰色かび病、10.接合菌（*Rhizopus oryzae*）による果実腐敗、11.アブラナ科白さび病、12.トマト葉かび病、13.トマトうどんこ病、14.ニラさび病、15.キャベツ根こぶ病



16.キュウリベと病、17.キャベツベと病の葉裏

３）顕微鏡観察

※まず、見慣れること

・倍率感覚－植物細胞に対する病原菌の大きさ、数値は血球計測盤等で確認

・どこを見ているか＝三次元感覚

①形態観察：最近の顕微鏡は光が強いので植物組織を直接見れる

同定に有用な図書（＝イラスト、検索表が掲載されているもの）

属：植物病原菌類図説．小林享夫ら編（1992）、全国農村教育協会

種（胞子座を形成しない不完全菌）：Dematiaeous Hyphomycetes. Ellis MB (1971), Commonwealth Mycological Institute (CMI), UK

種（胞子座を形成する不完全菌）：The Coelomycetes. Sutton BC (1980), CMI, UK

種一般：「防菌防黴」（1990 年代前半の連載）「講座／真菌の分離と分類・同定」

土壌病害：新版土壌病害の手引．（1984）、日本植物防疫協会（ただし絶版）

※正確を期すには、各属単位くらいの単行書（ほとんどが洋書、絶版も多）や、いわゆる論文（総説含む）も必要

②主要な病原菌の同定 Key

べと病菌：葉裏の枝分かれした胞子柄

Pythium 属菌：太い無隔壁菌糸、遊走子（遊走子のう、球のう）

Phytophthora 属菌：無隔壁菌糸、球・楕円・レモン型などの遊走子のう

接合菌類：太い菌糸から胞子柄・胞子のう形成

Rhizoctonia solani：直角に分岐し分岐点がややくびれた菌糸

Alternaria 属菌：褐色胞子

灰色かび病菌：淡褐色の胞子柄から淡褐色楕円の胞子が房状に形成

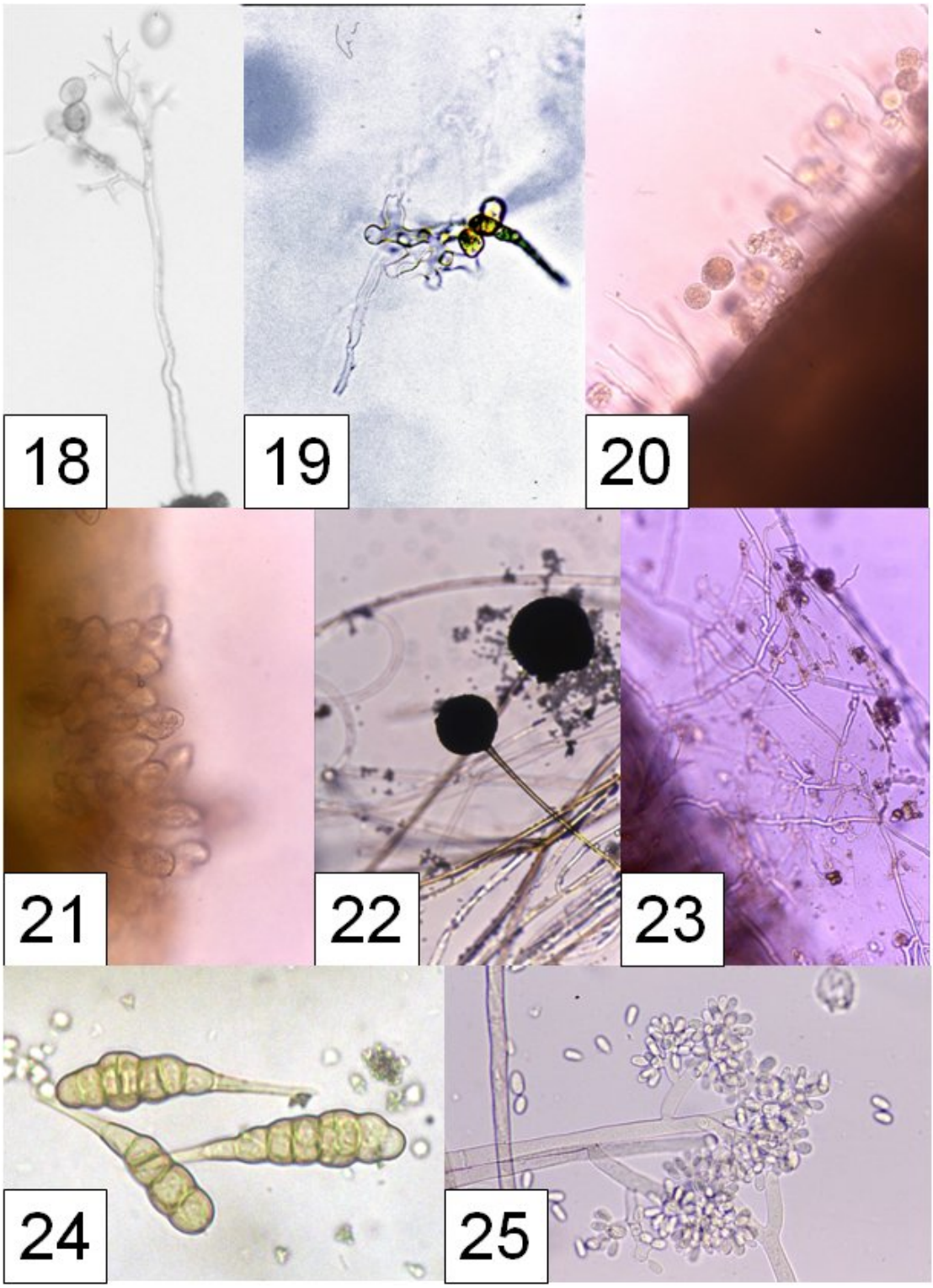
Fusarium 属菌：鎌型大型胞子（30～60μm）

Fusarium oxysporum：鎌型大型胞子に加えて、楕円の小型胞子を菌糸から分岐する短い胞子柄先端に擬頭状に形成

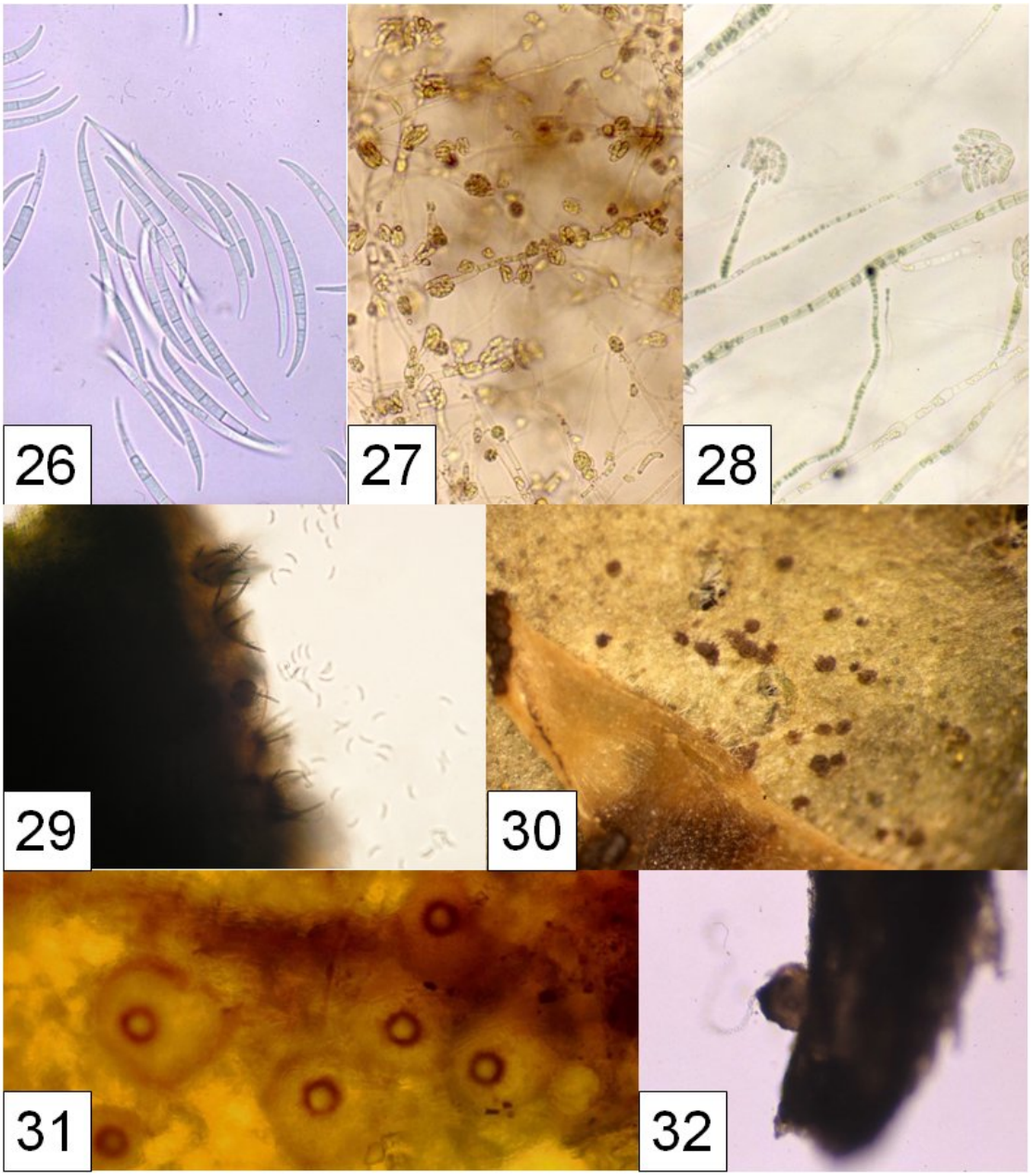
Fusarium solani：鎌型大型胞子に加えて、楕円の小型胞子を菌糸から分岐する長い　胞子柄先端に擬頭状に形成

Penicillium 属菌：箒状胞子柄から小型の球状胞子を多数形成

炭疽：褐色の剛毛、椀・皿状の子座で胞子形成、楕円または小型鎌形胞子



18.ホウレンソウベと病菌胞子柄、19.*Pythium aphanidermatum* の胞子のう、20.*P. aphanidermatum* の遊走子分化、21.ピーマン疫病菌遊走子のう、22.接合菌（*Rhizopus oryzae*）の胞子のう、23.*Rhizoctonia solani* 菌糸、24.*Alternaria solani*（ナス褐斑病菌）胞子、25.灰色かび病菌胞子柄



26. *Fusarium avenaceum*（鎌型大型胞子）、27. *F. oxysporum* 小型胞子の擬頭状形成、28. *F. solani* 小型胞子の擬頭状形成、29. 炭疽病菌剛毛と胞子果、30. アーチチョーク葉の *Phoma* 属菌胞子殻、 31. *Phoma* 属菌胞子殻、32. キャベツ根朽病菌（*Phoma lingam*）胞子殻頂口から胞子噴出

Phoma・*Ascochyta* 属菌：100～200μm の分生子殻の頂口から、楕円形胞子噴出
[*Septoria* 属菌：100～200μm の分生子殻の頂口から、ひも状胞子噴出]
[*Phomopsis* 属菌：100～200μm の分生子殻の頂口から、ひも状と楕円形胞子噴出]
[*Phyllosticta* 属菌：100～200μm の分生子殻の頂口から、楕円形で糸がついた胞子噴出]
[*Pyrenochaeta* 属菌：根に分生子殻、楕円形胞子]
[*Cercospora*・*Pseudocercospora* 属菌：気孔等にかたまって形成される胞子柄から糸・針状の胞子形成]

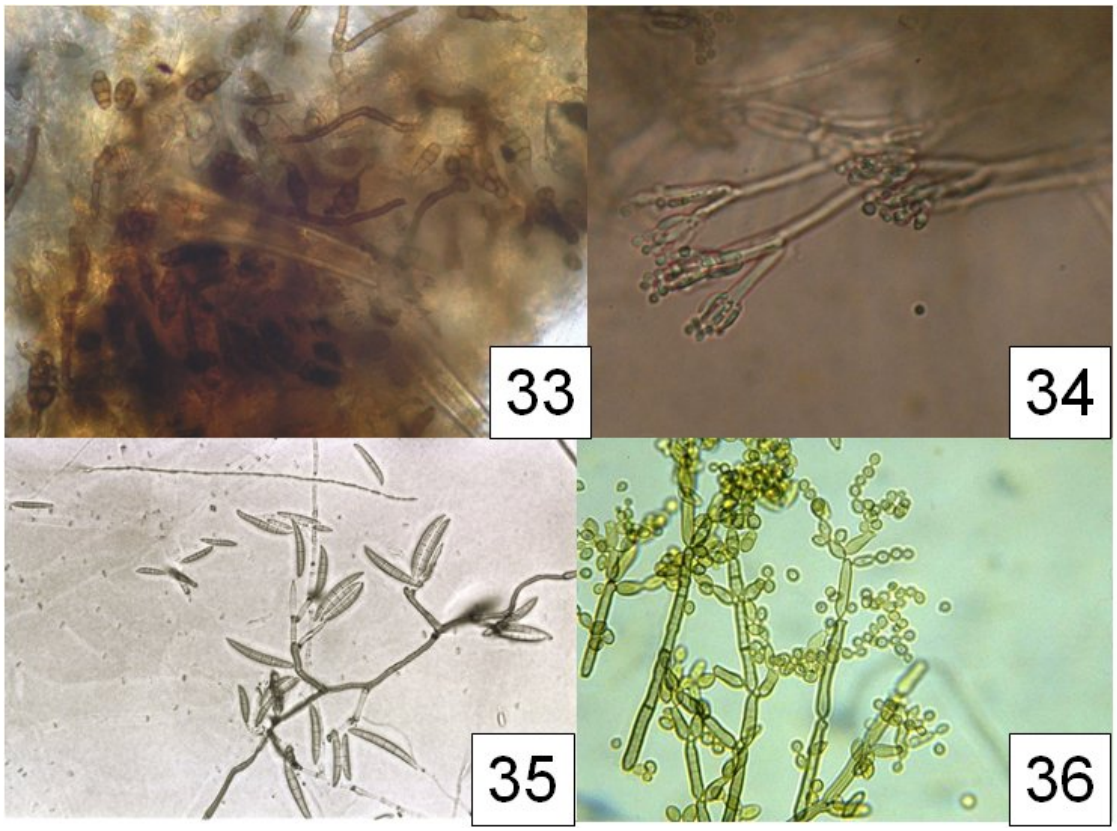
[*Cladosporium cucumerinum* : 長くまっすぐな褐色胞子柄から楕円形褐色胞子を大量に形成]

[*Corynespora cassiicola* : 気孔等にかたまって形成される胞子柄から長い棍棒状胞子を形成]

[*Stemphylium* 属菌 : 縦横に隔壁がある褐色俵型胞子]

③注意すべき雑菌達

Alternaria alternata（病原菌のこともあり）、*Penicillium* 属菌、*Fusarium oxysporum*、*Fusarium semitectum*、*Cladosporium* 属菌、酵母類、（*Rhizopus* 属菌、炭疽病菌）



33.*Alternaria alternata*、34.*Penicilllium* 属菌胞子柄、35.*Fusarium semitectum* 鎌形大型胞子形成、36.*Cladosporium* 属菌胞子柄

④（参考）細菌病の検鏡

導管性病害（ナス科青枯、アブラナ科黒腐病など）：維管束部から大量の細菌が流出

その他：罹病部の植物表皮下に、ドーム型の菌塊

（バラバラいるものは、多量でも雑菌が多い）

３．さらなる（その他の）操作

１）菌不明な場合　→　**菌分離**

罹病組織の表面殺菌：70%エタノール数十秒、1%次亜塩素酸 Na 数十秒、水洗

培地：WA（30%乳酸を加えると細菌が繁殖しにくい、佐藤（2008））

（必要な場合は単菌糸・胞子分離）

単菌糸分離：上記培地で罹病組織または粗分離後の菌叢を培養して生育した菌叢の周縁部から単菌糸を培地ごと移植する

単胞子分離：胞子形成している粗分離後の菌叢や罹病組織から胞子を掻き取って、上記培地に画線する。または、粗分離後の菌叢上で形成された胞子の懸濁液を作成し、上記培地にまく。その後 1 日培養し、実体顕微鏡下で、発芽した胞子を培地ごと移植する

栄養培地上で特徴ある菌叢の病原菌

F. oxysporum：赤紫色素（f. sp. *conglutinans* はクリーム色）

F. avenaceum：紅～赤紫色素

菌核病菌：白色綿毛状菌糸と黒色ネズミ糞状菌核

白絹病菌：白色菌糸束と茶色球状菌核、生育速

接合菌：太く直線的な白色気中菌糸、胞子のうや胞子塊の微小黒点、生育速

Pythium 属菌：白色気中菌糸、生育速

Phytophthora 属菌：白～ベージュ色降霜状

[灰色かび病：白～ベージュ色、様々な形・大きさの黒色菌核]

[分生子殻を作る菌：様々だが分生子殻を形成するものあり]

[*Cercospora*・*Pseudocercospora* 属菌：様々だが生育遅い]

2）菌分離できない（雑菌まみれ含む）場合　→　**接種**

罹病組織をそのまま宿主植物に刺し込む、貼り付けるなど

4．参考となる研究会など

・植物病原菌類談話会（日本植物病理学会大会サテライト）

第 1 回（2002）（*Fusarium*、疫病）

第 2 回（2003）よくわかる「形態と分子系統入門」－その 1－（紫紋羽、*Verticillium*、うどんこ病）

第 3 回（2002）炭疽病菌をめぐる諸問題

第 4 回（2003）卵菌類をめぐる諸問題

第 5 回（2004）*Fusarium* 特集

第 6 回（2005）*Rhizoctonia* 属菌

第 7 回（2006）病害診断依頼を受けてから、病原菌の推定、分類・培養、標本作成を行うまで

第 8 回（2007）みえていてもみえなかった（ことにする？）、分生子殻を形成する不完全菌

第 9 回（2008）しってるさ！属までは *Alternaria*、*Cercospora*、*Helminthosporium*

第 10 回（2009）あなたなしでは生きられない・・・絶対寄生菌

・日本植物病理学会植物病害診断研究会（2007～）

・日本植物病理学会植物病害診断教育プログラム（2004～）

引用文献

日本植物病理学会編（2000）日本植物病名目録．日本植物防疫協会
日本植物病理学会（2009）日本植物病名目録追録．http://www.ppsj.org/pdf/misc-tsuiroku090602.pdf
佐藤豊三（2008）新病害究明の手順とキーテクニック・小道具類．植物防疫 62:223-227
White TJ ら（1990）Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics.「PCR protocols, a guide to methods and applications （Innis ら編）」. Academic Press (USA)

野菜ウイルス病の診断技術

野菜茶業研究所
野菜 IPM 研究チーム
寺見文宏・大西　純

野菜に発生するウイルス病は多種多様であり、ウイルス病を的確に診断することは防除対策を考える上で重要である。ウイルス病の診断においては、特定のウイルスによる感染の有無を明らかにする場合と、感染しているウイルスの種類を明らかにする場合とがある。後者の場合は、時として、未知ウイルスの同定を必要とすることがあり、ウイルスの同定には専門的な知識と技術を必要とする。そこで本研修では、ウイルス診断試薬などかそろっている特定の病原ウイルスの診断技術について、トマトのウイルス病を例に挙げて概説する。

１．トマトに発生する主なウイルス

アルファルファモザイクウイルス（AMV）
キク茎えそウイルス（CSNV）
キュウリモザイクウイルス（CMV）
ジャガイモウイルス X（PVX）
ジャガイモウイルス Y（PVX）
タバコ巻葉ウイルス（TbLCV）
トマト黄化えそウイルス（TSWV）
トマト黄化葉巻ウイルス（TYLCV）
トマトモザイクウイルス（ToMV）

２．病徴による診断

1）えそを伴わない葉のモザイク・奇形症状 = モザイク病
推定される病原ウイルス：CMV, PVX,（TMV 抵抗性を持たない品種では ToMV も）

2）茎のえそ、葉の退緑・えそ, 果実のえそ = 黄化えそ病、茎えそ病、条斑病
推定される病原ウイルス：CSNV, TSWV, CMV, ToMV, PVX+ToMV

3）葉の退緑・黄化、葉巻・縮葉 = 黄化萎縮病または黄化葉巻病
推定される病原ウイルス：TbLCV, TYLCV

３．生物検定法による診断

ウイルスはそれぞれ固有の宿主範囲があり、各宿主で特有の病徴を示す。この宿主範囲・病徴の違いを利用した生物検定法が、指標植物への接種試験である。時間と場所を要するが、最も安価に実施できるウイルス診断技術である。表 1 に指標植物での各ウイルス

の病徴をまとめた。ただし TbLCV と TYLCV はコナジラミによる虫媒接種試験が必要であるので省略した。両ウイルス以外は、葉の磨砕汁液をカーボランダムとともに塗沫して指標植物へ接種することで病原ウイルスを検出・診断することが出来る。

表 1　トマトに感染するウイルスの指標植物と病徴

	N. glutinosa		タバコ Bright Yellow		D.stramonium		アカザ		センニチコウ		ソラマメ	
	接種葉	上葉	接種葉	上葉	接種葉	上葉	接種葉	上葉	接種葉	上葉	接種葉	上葉
AMV	L	M	L	M	−	M	L	−	L	M	L	−
CMV	−	M	−	M	-	M	L	−	L	M	L	−
CSNV	L	−	L	VC	L	M	L	−	L	−	L	−
PVX	−	M	−	M	L	M	L	−	L	−	−	−
PVY	−	M	−	M	−	−	−	−	−	−	−	−
TMV	L	−	−	M	L	−	L	−	L	M	−	−
ToMV	L	−	L	−	L	−	L	−	L	M	−	−
TSWV	L	−	L	−	L	N, M	L	−	L	N, M	L	N

L：局部病斑, M：モザイク， VC：葉脈透過, N：えそ

4．ウイルス抗体を利用した診断

精製したウイルス粒子あるいはをウサギ等に注射することにより、注射したウイルス粒子に対する抗体が産生される。先に挙げたトマトに発生する主なウイルスについては、TbLCV 以外のすべてのウイルスに対する診断用抗体が市販されている（日本植物防疫協会、Neogen 社、Agdia 社など）。トマト以外の作物についても、被害の大きいウイルスの抗体は多数市販されている。

抗体を利用したウイルス診断技術には様々のものがあるが、市販抗体の多くはイムノクロマト法（免疫試験紙）もしくは ELISA 法（酵素結合抗体法）のキットとして販売されているので、それぞれの技術について解説することとする。

1）イムノクロマト法

ニトロセルロース膜のストリップに固定化したウイルス抗体で、金コロイドで標識したウイルス抗体と反応したウイルスを捕捉して、ウイルス感染の有無を赤色のバンドとして肉眼判定できる試験方法である（図 1）。イムノクロマト法の特徴は、特別な装置を必要とせず、15 分程度で結果の判定ができる手軽である。問題はコストで、海外メーカーの製品しかないため、1 サンプルの診断に 1500 円前後を要する。通常のウイルス

検出には問題のない感度であるが、感染初期の検定やTYLCVのような濃度の低いウイルスでは、感染していてもバンドが現れないことがある。

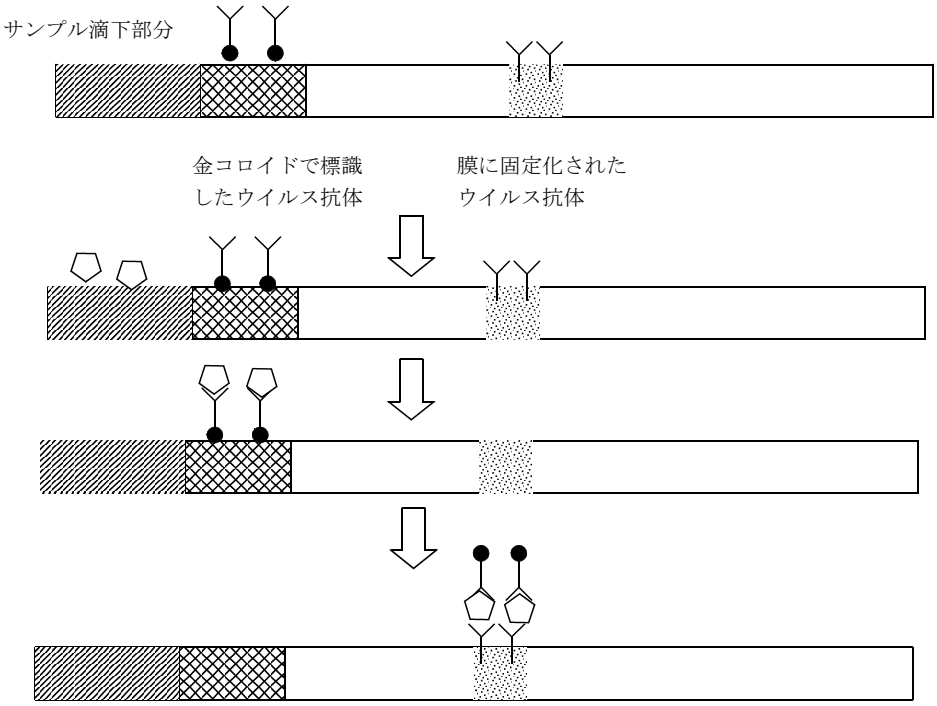


図１イムノクロマトによるウイルス検出の原理

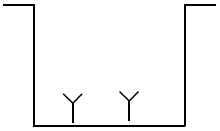
２）ELISA法

ELSA法は、アルカリフォスファターゼという酵素を結合させたウイルス抗体を用い、酵素反応で基質が発色する色程度でウイルスの有無・濃度を調べる技術である。ELISA 法にも各種の変法があるが、ここでは市販キットの多くが採用している直接二重抗体サンドイッチ ELISA（DAS-ELISA）法を紹介する。細かい反応時間等は製品の説明書参照のこと。

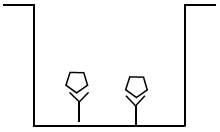
【DAS-ELISAの手順】

①コーティング抗体のマイクロタイタープレートへの吸着

ウイルス抗体pH10.0前後のコーティング液で希釈して、マイクロタイタープレートのウェルに入れて、ウェル内壁に吸着させる。キット付属のの洗浄液でウェルを洗浄するなお抗体コーティング済みのキットも多い。

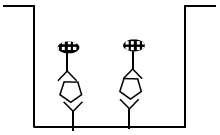


②検定サンプルの希釈汁液を加え、抗体と反応させる後、洗浄する。



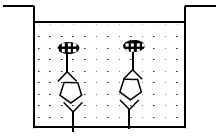
③酵素結合ウイルス抗体の添加

希釈した酵素結合ウイルス抗体を加え、コーティング抗体で捕捉されているウイルスと反応させた後、洗浄する。



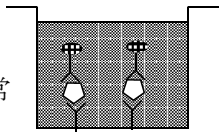
④基質液の添加

酵素の基質液(p-nitrophenyl phosphatet が最も一般的)を加える。



⑤結果の判定

基質液の着色の有無を調べる(p-nitrophenyl phosphatet の場合黄色に発色する)。吸光度を調べるときは波長を 405nm とし、通常 0.1 以上の値を陽生とする。



ELISA 法はイムノクロマト法に比べると、感度は同等で 1/10 ～ 1/50 のコストで診断できる。日本植物防疫協会が販売する ELISA 法キットでは、1 サンプル当たりのコストが 20 円以下と安価であるが、必ずしもしな品揃えが豊富とはいえず、トマトに発生するウイルスについてみても、AMV, CSNV, TbLCV, TYLCV の抗体は販売していない。海外メーカの製品では 1 サンプル当たりのコストが 200 ～ 300 円と高くなるが、イムノクロマト法に比べるとまだ遙かに安価である。海外製品の場合、ポジティブコントロールにウイルスが添付されている製品があるので、この場合農林水産大臣の特別輸入許可が必要となるので注意が必要である。ELISA 法の問題点は、結果の判定までに半日から 2 日を要し、遠心機や吸光度形などの装置が必要な点である。

日本植物防疫協会が扱っている抗体について参考までに以下に示した。

RSV:イネ縞葉枯ウイルス
RDV:イネ萎縮ウイルス
BaYMV:オオムギ縞萎縮ウイルス
CYVY:クローバー葉脈黄化ウイルス
BeYMV:インゲンマメ黄斑モザイクウイルス
PSV:ラッカセイわい化ウイルス
ABMV:アズキモザイクウイルス
BBWV:ソラマメウイルトウイルス
PVX:ジャガイモウイルス X
PVX:ジャガイモウイルス Y
TMV-OM:タバコモザイク−普通系
ToMV:モザイク−普通系
PMMoV:トウガラシマイルドモットルウイルス
TMV-W:タバコモザイク−ワサビ系
CMV:キュウリモザイク
TSWV:トマト黄化えそウイルス
CGMMV:スイカ緑斑モザイクウイルス
KGMMV:キュウリ緑斑モザイクウイルス
MNSV:メロンえそ斑ウイルス
MYSV:メロン黄化えそウイルス
ZYMV:ズッキーニ黄斑モザイクウイルス
WSMV:スイカ灰色斑紋ウイルス
SqMV:スカッシュモザイクウイルス
MiLBV:ミラフィオリレタスウイルス
TuMV:カブモザイクウイルス
CyMV:シンビジュウムモザイクウイルス
CarMV:カーネーション斑紋ウイルス
CVB:キク B ウイルス
LSV:ユリ潜在ウイルス
INSV:インパチエンスネクロティックスポットウイルス
ORSV:オドントグロッサムリングスポットウイルス
TRSV:タバコ輪点ウイルス

ASGV:アップルステムグルービング　　EAPV:パッションフルート東アジア
ウイルス　　SDV:温州萎縮ウイルス
GFV:ブドウファンリーフウイルス

3）ティッシュプリント法

ティッシュプリント法は、元はウイルスの組織内の分布をニトロセルロースメンブレンに写し取って、酵素結合抗体により肉眼で観察するために開発された技術である。ELISA 法用の酵素結合抗体がそのまま利用でき、ELISA 法よりも作業性が高いことからウイルス病診断でもよく利用されている。特に TYLCV のような師部細胞に ELISA 法よりもしか存在しないウイルスでは、濃度の高い師部組織でのウイルスの有無が可能である。

【ティッシュプリント法手順】

①サンプルのブロット

1）メンブレンに鉛筆などで区画線を書き、サンプルIDが分かるようにする
（メンブレンには指紋などがつかないようにする）

2）カミソリなどを用いて、感染植物の小葉の茎などを切る
（サンプルごとにカミソリは新しいものに交換する）

3）切断面をメンブレンに軽く押し当てる。
（必ず健全植物も同じメンブレンにブロットし、陰性コントロールとする）
（強く押し当て過ぎると、非特異反応が出る。極微量で十分に検出できる）

4）5分程度乾燥させる

ウイルス

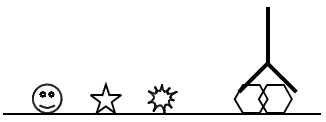
②抗原抗体反応

1）TTBSでメンブレンをすすぎ、表面のゴミや色素を出来る限り洗い流す

2）ブロッキング緩衝液にてメンブレンをブロッキング（室温・30-60分間）

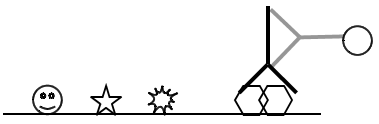
3）ウイルス抗体をブロッキング緩衝液で
希釈（10000倍希釈）する

4）パラフィルム上に抗体液をとり、
メンブレンを浸す（室温・30-60分間）



5）メンブレンをTTBS中で洗浄
（5-10分間・2-3回）

6）ウイルス抗体に反応する酵素結合２次
抗体をブロッキング緩衝液で希釈
（10000倍希釈）する

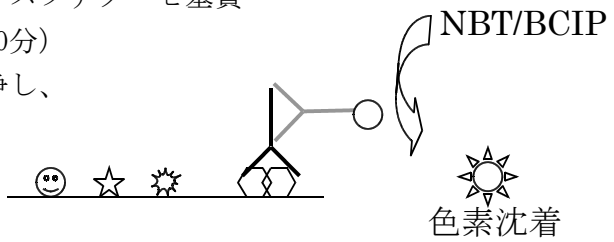


7）パラフィルム上に抗体液をとり、メンブ
レンを浸す（室温・30-60分間）

8）メンブレンをTTBS中で洗浄（5-10分間・2-3回）

③発色反応・判定

１）メンブレンを発色緩衝液で洗浄（5分間・1回）
２）用時調整したアルカリフォスファターゼ基質液にて発色沈着反応（～30分）
３）蒸留水でメンブレンを洗浄し、発色反応を停止する
４）判定



判定例

＜Tips＞

①－４）　→　乾燥後に４℃乾燥状態で保存可能（経験的には１ヶ月程度）

②－２）　→　ブロッキングには様々な試薬がある。ここではでは下記に示したブロッキンググ液を用いるが、参考の為に他の試薬も示す。

［ブロッキング液１］

＊1% ブロック-TTBS（1% Block reagent-TTBS）

10% Block reagentのストック溶液を終濃度が1%になるように、TTBSに溶かす。

＊10% Block reagentストックの調製

Block reagent(ロッシュ, 50g, ¥11700, Cat. No. 11 096 176 001)の粉末を終濃度が10%となるように0.1Mマレイン酸-0.15M NaCl, (pH7.5)に良く懸濁してから加熱して溶解。オートクレーブをして完全に溶解させる。分注して冷凍保存。

（長所）大抵の場合はこの方法で対応できる。
イムノグロブリン成分が入っていないか、酸加水分解さえているので非特異反応が低く、AP や POD など各種酵素活性を阻害しない。内容物が明らかではないが、カゼインと界面活性剤が入っていると思われる。

（短所）溶解しにくく、価格がやや高価。

［ブロッキング液２］

＊1-5%正常血清-TTBS

２次抗体を作った動物種の正常血清(Normal serum)を終濃度1-5%となるようにTTBSにて希釈する。例えば、２次抗体がヤギにて作製された抗体ならば、正常ヤギ血清を使用する。

（長所）古典的な方法であるが、効果的。
（短所）高価な場合があるが、抗体を作製した経験のある機関では手に入りやすい。
イムノグロブリンが主成分であるために、抗原やサンプルによって非特異反応が抑えられない場合がある。

③－２）　→　各メーカーより混合調製された基質液が販売されている。
自前で調製する場合は下記を参照のこと。

＊基質液Ａ：0.033% NBT(nitro blue tetrazolium: Sigma, 5g, N6876)となるように緩衝液(100mM Tris-HCl(pH9.5)-100mM NaCl-5mM $MgCl_2$)に溶解
＊基質液Ｂ：5% BCIP(5-bromo-4-chloro-3-indolyl-phosphate: Sigma, 1g, B8503) となるようジメチルホルムアミドに溶解
＊Ａ：Ｂ＝３００：１となるように使用直前に混合

５．遺伝子診断

近年、多数の植物ウイルスについて、遺伝子の塩基配列情報が明らかとなってきており、先に挙げた 9 種類のトマトに発生する主なウイルスすべてについて、遺伝子増幅法による遺伝子診断が可能となっている。遺伝子増幅法には、サーマルサイクラーと言う専用の反応装置が必要な PCR 法と、65 ℃のインキュベーターで実施できる LAMP 法や ICAN 法がある。原理的には、いずれも微生物由来の DNA 合成酵素を用いて、増幅したい遺伝子の一部を試験管の中で繰り返し合成する技術である。増幅された DNA はアガロースゲル電気泳動により検出できるが、LAMP 法では反応液が白濁して肉眼で結果の判定が可能である。植物ウイルス用の遺伝子診断キットは、まだ多くは市販されていないので、必要な試薬類を別々に購入する必要がある。

DNA 合成酵素と言えど、何も無いところから DNA を合成することはできない。元になる DNA にその DNA の一部と相補的に結合する短い DNA(プライマー)を加えてることで、DNA 合成酵素はプライマー端から DNA を合成し始める。遺伝子増幅法による遺伝子診断のカギは、プライマーの塩基配列の選択(プライマーの設計)にある。野菜のウイルス病診断のためのプライマーについての情報は、野菜茶業研究所をはじめ、各地域の農業研究センターや都道府県の農業研究センターに照会すればよい。

植物ウイルスの多くは DNA ではなく RNA を遺伝子として有している。DNA 合成酵素は RNA を元に DNA を合成することはできないので、RNA を元に DNA を合成する逆転写酵素を利用して RNA に相補的な DNA を合成してから遺伝子診断を実施する。

9 種類のトマトに発生する主なウイルスのうち、AMV、CSNV、CMV、PVX、PVY、TSWV、ToMV の 7 種類は RNA 型ウイルスなので、遺伝子診断を行うには RNA 抽出と逆転写反応が必要である。TbLCV や TYLCV の DNA 型のウイルスでは、汁液から直接遺伝子診断が可能で、TYLCV については診断キットが市販されている(栄研科学「トマト黄化葉巻病診断キット」)。おな植物から RNA や DNA を抽出するキットは多数販売されている。

【LAMP法によるトマト黄化葉巻病の診断】

LAMP法(Loop-Mediated Isothermal Amplification)は栄研化学株式会社により開発され、従来の遺伝子増幅法に代わる簡易・迅速な手法である。一般に、核酸を検出して診断する場合、検定試料中の微量の核酸を増幅しなければならず、これまでPCR(Polymerase Chain Reaction)法が多用さていた。LAMP法は、PCR法と比較して専用の増幅装置が必要なく、一定温度で反応を完了することより初期投資費用が抑えられるなどの利点がある。TYLCVのDNAを検出する方法として、現在(2009/10/18)入手可能な市販キットを用いたLAMP法を行う。

試薬・消耗品・備品など

◆0.2mL PCRチューブ：リアルタイム検出の場合は透過性の高いチューブが必要
◆ピペットマン(200μL、1000μL)同等品
◆ピペットチップ：フィルター付推奨
◆爪楊枝（滅菌済みで十分に乾燥したもの）
◆恒温機：設定温度60-65℃と80℃
◆UV照射装置

＜手順＞ 本法はキットの簡易マニュアルに順ずる

①検査反応液の調整

１）氷上にて反応液を調製し、必要なテスト数分を分注
２）反応開始まで、氷上に維持

	テスト数		
	1	5	10
ウイルス検査液	4.6μl	23μl	46μl
蛍光発色液	0.2μl	1μl	2μl
酵素液	0.2μl	1μl	2μl
合計	5μl	25μl	50μl

②サンプリングと増幅反応

１）爪楊枝にて、検定サンプルを軽く突く
２）反応液に爪楊枝の先端を軽く触れさせる
（反応液に爪楊枝を長く浸すと、乾燥した爪楊枝が反応液を吸収してしまう）
３）チューブを63℃で反応させる(1-2時間程度)
４）反応を停止させる場合は、80℃で加熱し酵素を失活させる（2-5分間）

③発色反応・判定

１）UV照射装置にて、反応チューブの蛍光を確認する
２判定

＜Tips＞

①－１）→　LAMP法は非常に高感度な為、PCR産物の電気泳動を行う場所等で検査反応液を調製するとコンタミネーションが起きる可能性がある。出来れば、作業区画を分けて調整。

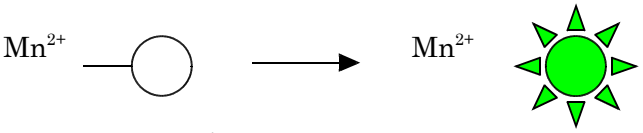
②－４）→　反応産物はチューブのフタを開けずに、判定後に廃棄(汚染を防ぐため)

③－１）→　蛍光物質(カルセイン)の励起波長は240-370nmと広範囲に渡るため、波長範囲の広い照射装置を用いると陰性コントロールでも蛍光が観察される(λex=325nm/λem=515nm)。キットの説明では、320nm付近ではバックグラウンドが高いため、中波長を除く短波(240-260nm)または長波(350-370nm付近)側の波長を使用すると、反応特異的な蛍光を観察できる。また青色LEDライト(450nm付近)でも励起可能であるが、同様にバックグラウンドが高い。

＜備考＞

◆蛍光物質(カルセイン)

本キットには、反応産物の確認のためにカルセインが含まれている。カルセインは重金属(マンガンなど)と錯体を形成すると蛍光を消失し、錯体が解消されると蛍光を発する。



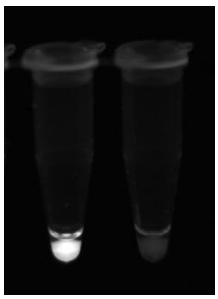
カルセイン　　錯体が解消され Mg^{2+} イオンと解離したカルセイン

◆目視による増幅の確認

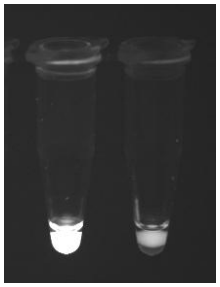
PCR法及び、LAMP法をはじめとするDNA鎖を伸長・合成する酵素を用いた反応では、副産物としてピロリン酸が生成しマグネシウムと反応してピロリン酸マグネシウムが生成される。増幅産物が非常に多い反応系では、同じく多量のピロリン酸マグネシウムが生成し溶解度積を上回った時点で沈殿を生じて白濁化する。また、ピロリン酸はマンガンとも反応し、上記の蛍光物質よりマンガンを奪い錯体解消にも働く。

◆LAMP法の判定（異なる蛍光励起波長による見え方の違い）

予め使用する照射装置でのバックグラウンドをテストすることが望ましい。
下記の写真は陽性(+)及び陰性(-)コントロールの増幅結果を示す。



UV 照射装置
(一般的なゲル撮影装置)



青色LED照射装置

参考文献など

植物ウイルス全般

池上正人ら著(2009),植物ウイルス学，朝倉書店，東京，pp196

都丸敬一ら編(1983)，植物ウイルス辞典，朝倉書店，東京，pp632

植物ウイルス研究所学友会編(1984)，野菜のウイルス病，養賢堂，東京，pp474,

血清学的診断関係

Hampt, E.ら編(1990), Serological methods for detection and identification of viral and bacterial plant pathogens - a laboratory manual, APS press, St. Paul, USA, pp389.

テイッシュプリント関係

Dot immunobinding assay (DIBA) 及びTissue print immunoblot (TPI) によるトマト黄化葉巻ウイルス (TYLCV) の簡易検出. 平成16年度九州沖縄農業研究成果情報

遺伝子診断関係

中山 広樹()バイオ実験イラストレイテッド3　本当にふえる PCR，秀潤社，東京，pp162

LAMP 法関係

トマト黄化葉巻病診断キット取扱説明書. 株式会社ニッポンジーン

Notomi T, Okayama H, Masubuchi H, Yonekawa T, Watanabe K, Amino N, Hase T., (2000). Loop-mediated isothermal amplification of DNA. *Nucleic Acids Res* 28(12): e63.

福田至朗、穴井尚子、加藤政司、吉村幸江、深谷雅博、矢部和則、大矢俊夫、神戸三智雄(2005)，簡易な鋳型調製による loop-mediated isothermal amplification (LAMP) 法を用いたトマト黄化葉巻ウイルスの検出. 関西病虫害研究会報 47: 37-41.